

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

Aplikace technické diagnostiky na ventilátory

Application of technical diagnostics
to fans

Student:

Karel Kadrnožka

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. David Šeděnka

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání bakalářské práce

Student:

Karel Kadrnožka

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování

Téma:

Aplikace technické diagnostiky na ventilátory
Application of Technical Diagnostics to Fans

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci bakalářské práce aplikujte technickou diagnostiku na provoz ventilátorů. Rozeberte tuto problematiku, navrhněte a zvažte vhodné metody pro sledování jejich technického stavu, zvolte vhodná místa pro umístění snímačů. Popište přístrojovou techniku a softwarové nastavení pro tuto aplikaci. Proveďte potřebná měření a vyhodnocení naměřených dat.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Rozsah práce min. 35 stran textu.

Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost I - Tribodiagnostika*. 1. vydání, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2001, 158 s. ISBN 80-7078-883-6

ŠAFR, E. *Tribotechnika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. 300 s. 04-243-84 .

ŠAFR, E. *Technika mazání*. 2. dopl. vydání, SNTL Praha - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1970. 381 s. ISBN 04-010-70

HRADECKÝ, F., VLK, M. *Tribotechnika*. 1. vydání, Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1984. 297 s.

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka*. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

FS_SME_05_003 *Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce* Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, 2018. 20 s

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Šeděnka**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019


.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále je Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20.května 2019

.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Karel Kadrnožka

Adresa trvalého pobytu autora práce: U Stadionu 926, Rychnov nad Kněžnou 516 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KADRNOŽKA, K. *Aplikace technické diagnostiky na ventilátory: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2019, 62 s. Vedoucí práce: Šeděnka, D.

Bakalářská práce je zaměřena na aplikaci technické diagnostiky na ventilátorech a zabývá se otázkou, zdali je aplikace vibrační diagnostiky, z hlediska preventivní údržby ventilátorů, přínosná. V mnoha případech, kdy jsou ventilátory nezbytně nutné pro hladký chod výroby ve výrobním podniku, je její aplikace téměř nezbytná z důvodu zachování provozuschopnosti a eliminace neplánovaných odstávek. Bakalářská práce přináší nejen popis aplikace vibrační diagnostiky na ventilátorech ve společnosti ROCKWOOL, a.s., ale také poukazuje na často detekované nedostatky, které lze pomocí měření vibrací zachytit. Výsledkem je souhrn návrhů a doporučení na odstranění příčin poškození, které v závěru vedou až k proakci.

KLÍČOVÁ SLOVA

Diagnostika, porucha, trend hodnot, nevývaha, nesouosost, mechanické uvolnění, nedostatečné mazání, rychlá Fourierova transformace.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KADRNOŽKA, K. *Effect Application of technical diagnostics to fans*: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Construction of Production Machines and Equipment, 2019, 62 p. Thesis head: Šeděnka, D.

The bachelor thesis is focused on application of technical diagnostics to fans and deals with the question of whether the application of vibration diagnostics is beneficial in terms of preventive fan maintenance. In many cases, where fans are critical to the smooth running of the manufacturing plant, its application is almost necessary to maintain uptime and eliminate unplanned downtime. The bachelor thesis provides not only a description of the application of vibration diagnostics on fans in the company ROCKWOOL, a.s., but also highlights frequently detected defects, which can be captured by vibration measurement. The result is a summary of suggestions and recommendations to eliminate the causes of damage that at the end lead to proaction.

KEY WORDS

Diagnostics, disorder, trend of values, unbalance, misalignment, mechanical release, insufficient lubrication, Fast Fourier transform.

Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek.....	13
Seznam použitých značek a symbolů.....	14
Seznam použitých zkratk.....	15
Úvod.....	16
1 Údržba a metody technické diagnostiky	17
1.1 Technická diagnostika v údržbě	18
2 Vibrodiagnostika	19
2.1 Rozdělení vibrodiagnostiky dle jednotlivých kritérií	20
3 Měřicí řetězec pro měření vibrací	22
3.1 Snímače vibrací	22
3.1.1 Akcelerometry	23
3.1.2 Připevnění snímačů	25
3.2 Datakolektory a analyzátory	26
3.2.1 Rychlá Fourierova transformace	26
3.2.2 Obálková analýza	28
4 Možné vibrační chování ventilátorů.....	30
4.1 Nevývaha	30
4.1.1 Statická nevyváženost	30
4.1.2 Momentová nevyváženost.....	31
4.1.3 Dynamická nevyváženost.....	32
4.2 Nesouosost.....	33
4.2.1 Rovnoběžná nesouosost	34

4.2.2	Úhlová nesouosost	35
4.3	Mechanické uvolnění.....	36
4.4	Ložiskové poškození – Valivá ložiska	37
5	ROCKWOOL, a.s.	40
5.1	Heistech, s.r.o.	40
6	Návrh měřicí metodiky a používaná přístrojová vybavení.....	42
6.1	Používaná přístrojová vybavení	42
6.2	Dlouhodobý přehled technického stavu ventilátorů s aplikovanou vibrační diagnostikou	43
7	Analýza příčin poškození ventilátorů.....	47
7.1	Nevývaha	47
7.2	Nesouosost.....	49
7.3	Mechanické uvolnění.....	50
7.4	Ložiskové poškození	53
7.5	Nedostatečné mazání	55
Závěr.....		59
Seznam použitých zdrojů.....		61

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Vanová křivka průběhu opotřebení	20
Obrázek 2 – Konečná fáze vanové křivky, možnosti identifikace	20
Obrázek 3 – Typický přenosný monitorovací systém	22
Obrázek 4 – Absolutní a relativní kmity	23
Obrázek 5 – Uspořádání piezoelektrických akcelerometrů Brüel & Kjær	24
Obrázek 6 – Typické frekvenční charakteristiky pro různé citlivosti piezoelektrických akcelerometrů	25
Obrázek 7 – Vliv montáže akcelerometrů na frekvenční charakteristiky	26
Obrázek 8 – Zobrazení vibrací soustrojí, jejich skládání a zobrazení ve frekvenčním spektru	27
Obrázek 9 – Časová charakteristika s parametry vibrací	28
Obrázek 10 – Ilustrace základního principu detekce a analýzy obálky	29
Obrázek 11 – Statická nevyváženost	31
Obrázek 12 – Příklad frekvenčního spektra s nevyváhou statickou či momentovou	31
Obrázek 13 – Momentová nevyváženost	32
Obrázek 14 – Dynamická nevyváženost	32
Obrázek 15 – Příklad frekvenčního spektra s dynamickou nevyvážeností	33
Obrázek 16 – Možné příčiny nesouososti a) násilné spojení paralelně a úhlově přesazených spojkových kotoučů b) průhyb vlastní vahou při násilném spojení spojkových kotoučů	34
Obrázek 17 – Rovnoběžná nesouosost při rovnoběžném přesazení hřídelů	34

Obrázek 18 – Typický projev rovnoběžné nesouososti v radiálním směru s vyznačením otáčkové složky ve frekvenčním spektru.....	35
Obrázek 19 – Úhlová nesouosost	35
Obrázek 20 – Typický projev úhlové nesouososti v axiálním směru s vyznačením otáčkové složky	36
Obrázek 21 – Typy mechanických uvolnění.....	37
Obrázek 22 – Průběh postupného poškození ložiska v časovém signálu zrychlení vibrací	39
Obrázek 23 – Akcelerometr A102-1A	42
Obrázek 24 – Datakolektor ADASH VA3 Pro	42
Obrázek 25 – SPC ventilátor, jmenovitý výkon elektromotoru 1 MW, průměr oběžného kola 3,6 metru	47
Obrázek 26 – Trend vývoje rychlosti vibrací ložiska předlohy L4 ve vertikálním směru	48
Obrázek 27 – Spektrum FFT rychlosti vibrací v RMS ložiska předlohy L4 ve vertikálním směru před a po vyčištění a vyvážení oběžného kola	48
Obrázek 28 – Čerpadlo 2.....	49
Obrázek 29 – FFT spektrum rychlosti vibrací ložiska předlohy L4	50
Obrázek 30 – Ventilátor Heating room č. 2	51
Obrázek 31 – a) Poškození vnějšího kroužku ložiska L2 elektromotoru b) Poškození ložiskového víka elektromotoru ventilátoru Heating room č. 2	51
Obrázek 32 – FFT spektrum obálky zrychlení vibrací s hornopásmovým filtrem 1000 Hz ložiska elektromotoru L2 ventilátoru Heating room č. 2....	52

Obrázek 33 – FFT spektrum zrychlení vibrací ložiska elektromotoru L2 ventilátoru Heating room č. 2 v horizontálním směru	52
Obrázek 34 – FFT spektrum rychlosti vibrací RMS ložiska elektromotoru L2 ventilátoru Heating room č. 2 v horizontálním směru	53
Obrázek 35 – Ventilátor RS levý	54
Obrázek 36 – FFT spektrum obálky zrychlení vibrací s hornopásmovým filtrem 1000 Hz ložiska předlohy L3 ventilátoru RS levý	54
Obrázek 37 – Časový signál ventilátoru RS levý ložiska L3 předlohy v horizontálním směru s vyznačenými harmonickými násobky	55
Obrázek 38 – Ventilátor 17 Odtah spalin horního pásu	55
Obrázek 39 – Typy automatických maznic Pulsarlube	56
Obrázek 40 – Trend vývoje obálky zrychlení vibrací ložiska předlohy L4	56
Obrázek 41 – Kaskáda spekter zrychlení vibrací ložiska předlohy L4 ventilátoru 17 Odtah spalin horního pásu v horizontálním směru	57
Obrázek 42 – Kaskáda FFT spekter obálky zrychlení ložiska předlohy L4 ventilátoru 17 Odtah spalin horního pásu v horizontálním směru	58

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Pásmové hodnocení technického stavu zařízení	43
Tabulka 2 – Přehled vývoje technického stavu ventilátorů za rok 2017.....	44
Tabulka 3 – Přehled vývoje technického stavu ventilátorů za rok 2018.....	45
Tabulka 4 – Přehled vývoje technického stavu ventilátorů za rok 2019.....	46

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název	Jednotka
a	zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
BPI	poškození vnitřního kroužku ložiska	[Hz]
BPFO	poškození vnějšího kroužku ložiska	[Hz]
BSF	poškození valivých elementů ložiska	[Hz]
FTF	poškození klece ložiska	[Hz]
g	tíhové zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
P	výkon	[W]
t	čas	[s]
v	rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
-	citlivost	$[\text{mV} \cdot \text{g}^{-1}]$
y	výchylka	[mm]

Seznam použitých zkratk

a.s.	akciová společnost
BPFI	Ball Pass Frequency Inner Race (poškození vnitřního kroužku ložiska)
BPFO	Ball Pass Frequency Outer Race (poškození vnějšího kroužku ložiska)
BSF	Ball Spin Frequency (poškození valivých elementů ložiska)
COS	centrální osa setrvačnosti
ČSN	Česká technická norma
č.	číslo
FFT	Fast Fourier transform (rychlá Fourierova transformace)
FTF	Fundamental Train Frequency (poškození klece ložiska)
HFFT	Hexagonal Fast Fourier transform (Hexagonální rychlá Fourierova transformace)
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
OR	osa rotace
RMS	efektivní hodnota signálu
spol. s r.o.	společnost s ručením omezeným
s.r.o.	společnost s ručením omezeným

Úvod

Stále ještě existují společnosti, které nechtějí vydávat na údržbu, respektive do svých zařízení, vyšší finanční částky a zachovávají styl údržby po poruše. Situace se však vyvíjí a tento styl pomalu ustupuje. Manažeři údržby ve výrobních podnicích již zvažují otázku, zdali aplikovat v rámci technické diagnostiky vibrační diagnostiku.

S nastupujícím trendem v údržbě v rámci průmyslu 4.0 vyvstává povinnost zavádět metody technické diagnostiky. Zejména u nadnárodních společností je vyvíjen obrovský tlak na zachování provozuschopnosti strojů jako takových, protože při jejím nedodržení se ztrácí efektivita a konkurenceschopnost. Povinnost uchovávat a zachovávat stroje v provozuschopném stavu je rovněž zakotvena v normě ISO 14 001. Týká se to sice environmentu, ale pokud se společnosti řídí normou ISO 14 001, mají povinnost zachovávat stroje v takovém stavu, aby se stanovoval stav strojních zařízení a na základě toho se objektivně chránilo prostředí vůči výpadkům, haváriím a podobně.

V rámci přechodu na průmysl 4.0 by společnosti měly aplikovat metody technické diagnostiky. Otázka přechodu společností na průmysl 4.0 není, zda chtějí či nechtějí, ale je to již téměř povinnost, pokud chtějí obstát v dynamicky se rozvíjejícím konkurenčním prostředí.

1 Údržba a metody technické diagnostiky

Údržba se řadí mezi základní procesy výroby. Skládá se z kombinace všech technických, administrativních a manažerských činností po dobu životního cyklu objektu, zaměřených na udržení objektu ve stavu, nebo jeho navrácení do stavu, ve kterém poskytuje požadované funkce ¹.

Cílem údržby je udržování výrobních zařízení v technicky dobrém a provozuschopném stavu po celou dobu životního cyklu, a to za předpokladu vynaložení optimálních nákladů. Prodlužování provozuschopnosti a zvyšování provozní spolehlivosti strojů a zařízení, zajištění delších intervalů mezi údržbářskými odstávkami, efektivní technická a konstrukční podpora a účelnější využití informací, patří mezi faktory, které vedou ke zvýšení produktivity výroby ¹.

Mezi nejdůležitější prostředky k dosažení zajištěnosti údržby patří metody technické diagnostiky, zabývající se bezdemontážními a nedestruktivními metodami a prostředky stanovení technického stavu zařízení. Technická diagnostika je hlavním nástrojem revizní a kontrolně inspekční činnosti. Prostřednictvím metod technické diagnostiky se stanovuje nutnost a rozsah vykonávaných oprav ².

Výhody zavedení technické diagnostiky z technologického pohledu:

- odhalení poškozených zařízení – pomocí sledování trendů hodnot vibrací a frekvenční analýzou,
- určování zbytkové životnosti zařízení – pomocí regresivních nástrojů, neuronové sítě a podobně,
- plánování údržbářských odstávek a kontrol – předcházení neplánovaných odstávek,
- stanovení skutečného poškození částí zařízení – stanovování na základě endoskopie, případně demontáže zařízení ².

Výhody zavedení technické diagnostiky z ekonomického pohledu:

- snížení nákladů na provoz zařízení – zvýšení efektivity zařízení,
- minimalizace rizika možné havárie – využití predikce stavu zařízení,

- prodloužení životnosti zařízení,
- snížení spotřeby energií,
- snižování délky a četnosti údržbářských odstávek ².

1.1 Technická diagnostika v údržbě

Technická diagnostika je jedním z nástrojů údržby pro stanovení objektivního stavu zařízení. V technické diagnostice se aplikují různé metody k odhalení a zkoumání vad, například na základě vývoje trendu. Tyto metody v zásadě fungují na principu snímání mechanických vibrací, teploty zařízení, snímání hlučnosti a podobně. Poruchy vznikají za standardních i nestandardních podmínek. U standardních podmínek jsou dodrženy zásady správné údržby stanovené výrobcem. Nestandardní podmínky zahrnují chybný postup obsluhy a nevyhovující vnější podmínky ³.

Základní členění úkolů diagnózy:

- detekce – zaznamenání prvotních projevů poruchy,
- lokalizace – stanovení součásti, uzlu či místa, ve kterém vzniká porucha,
- specifikace – určení příčiny poruchy pomocí diagnostického signálu,
- predikce – uvedení diagnózy a prognózy zbytkové životnosti ³.

Moderní pojetí technické diagnostiky se snaží tyto úkony čím dál více digitalizovat a automatizovat, což je jeden předpoklad k dosažení nejvyššího stupně v péči a údržbě zařízení – průmysl 4.0 ⁴.

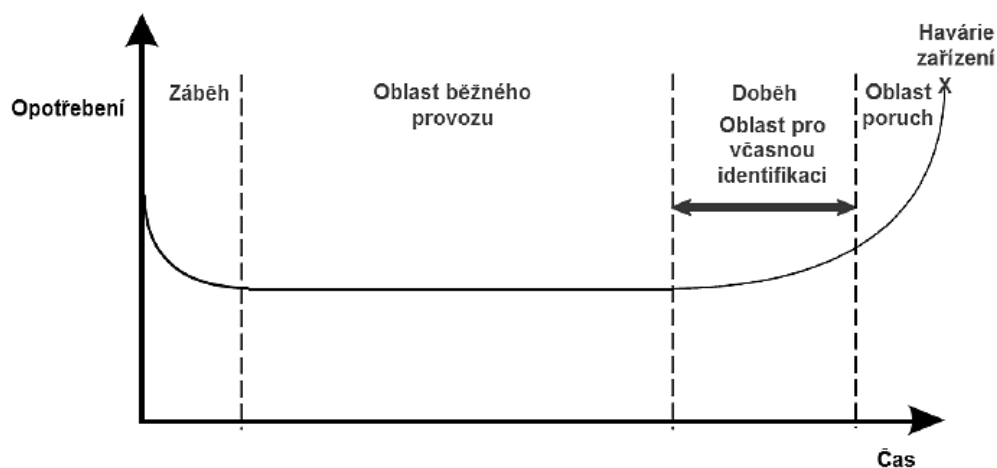
2 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika neboli diagnostika vibrací náleží mezi bezdemontážní nedestruktivní metody technické diagnostiky. Zdrojem dat, ze kterých se následně analyzuje a vyhodnocuje stav zařízení, je vibrační signál. Vibrace vznikají u strojů a zařízení, jejichž princip pohybu vyvolá dynamické chvění ⁵.

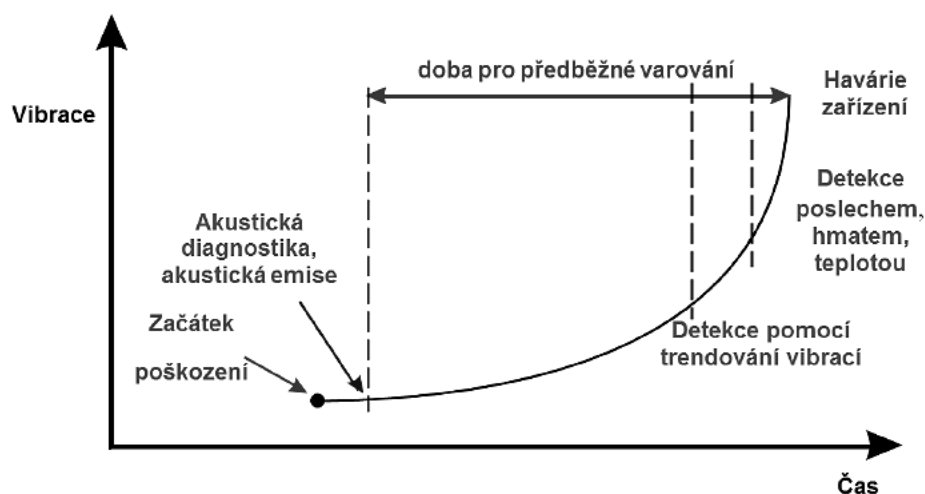
Vibrace u rotačních strojů jsou závislé na více aspektech. Nejvyšší vliv na průběh a velikost vibrací má dynamické namáhání stroje, dále se také projevuje stav ložisek, stav převodů, zadíráání, nevývaha, ohnutý hřídel, rezonance, mechanické uvolnění, nesouosost, opotřebení a trhliny. Jedním ze zásadních rozhodnutí je zvolení správného diagnostického systému, aby byl dosažen relevantní výsledek. Zvolení nevyhovujícího diagnostického systému může vést k chybnému určení stavu zařízení ⁵.

Cílem monitorování vibrací je poskytnutí adekvátních informací o provozním a technickém stavu zařízení, a to za účelem stanovení strategického plánu údržby. Součástí monitorování vibrací je i proces stanovení vývoje průběhu vibrací za dobu, po kterou měření probíhá ⁵.

Průběh opotřebení v čase vyjadřuje vanová křivka (viz Obrázek 1). V záběhové oblasti dochází ke zvýšenému opotřebení, které je způsobeno vzájemným záběhem součástí. Záběhové opotřebení se postupně snižuje, až se ustálí na provozním opotřebení. V doběhové oblasti dochází k postupnému zvyšování opotřebení, které vede až k prudkému nárůstu v oblasti poruch (viz Obrázek 2). Pokud nedojde k včasné detekci vznikající poruchy nebo včasné odstávce zařízení a velikost opotřebení se dostane do oblasti poruch, může dojít k havárii zařízení. Průběh opotřebení v čase vyjadřuje vanová křivka, kterou lze obdobným způsobem aplikovat na průběh vibrací, průběh hluku a průběh teploty ⁵.



Obrázek 1 – Vanová křivka průběhu opotřebení ⁵



Obrázek 2 – Konečná fáze vanové křivky, možnosti identifikace ⁵

2.1 Rozdělení vibrodiagnostiky dle jednotlivých kritérií

Rozdělení dle způsobu sledování diagnostikovaného zařízení:

- Jednorázové měření – zaznamenání aktuálního stavu zařízení přenosnými měřicími systémy. Tato metoda neposkytuje adekvátní možnost stanovení prognózy budoucího stavu ².
- Periodická pochůzková měření – snímače jsou trvale instalovány a měření je prováděno se stanovenou časovou periodou. Tato metoda umožňuje stanovit prognózu budoucího stavu zařízení ².
- Kontinuální měření – snímače jsou trvale instalovány a měření probíhá v reálném čase neboli v ON-LINE režimu. Tato metoda se často využívá v kombinaci s bezpečnostními a varovnými systémy ².

Základní poruchy a jejich projevy:

- nesouosost,
- mechanické uvolnění,
- nevývaha,
- ohnutý hřídel,
- porucha převodů,
- porucha ložiska ³.

Rozdělení původu nežádoucích jevů u elektrických zařízeních, především elektromotorů:

- vibrace ventilačního původu,
- vibrace elektromagnetického původu,
- vibrace mechanického původu ².

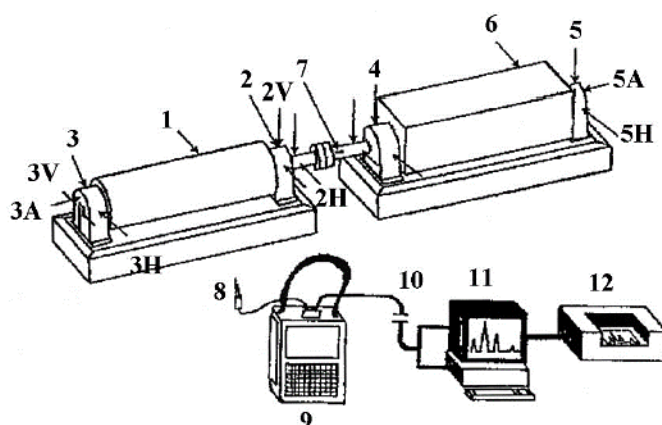
Nejčastější zdroje vibrací v rotačních elektrických zařízeních:

- závada v elektrických obvodech – poškozené vinutí statoru či rotoru, nedostatečné uzemnění,
- závada v magnetickém obvodu – přesycení některých částí magnetického obvodu, nesymetrie magnetických obvodů,
- závada mechanických částí – poškození rotorové tyče, poškození ložisek, nevývaha rotorů, nesouosost spojek, hydraulické a aerodynamické závady ².

3 Měřicí řetězec pro měření vibrací

Měřicí řetězec (viz Obrázek 3) je souhrn zařízení, který poskytuje na výstupu informaci o velikosti mechanického kmitání. Zpravidla se skládá ze snímače vibrací, stíněného kabelu a zařízení pro vyhodnocení výstupu ze snímače vibrací².

Jelikož předmětem bakalářské práce je rozbor dat především z off-line měření vibrací ventilátorů, tak níže uvedené možnosti měřicího řetězce se vztahují pro tento způsob sběru dat².



Obrázek 3 – Typický přenosný monitorovací systém²

Prvky měřicího řetězce pro měření vibrací:

1 – hnací stroj, 2 – (2V, 2H) měřící místa hnacího stroje na straně spojky, 3 – (3V, 3H, 3A) měřící místa hnacího stroje, 4 – (4V, 4H) měřící místa procesního stroje na straně spojky, 5 – (5H, 5A) měřící místa procesního stroje, 6 – poháněný procesní stroj, 7 – fázová reference, 8 – snímač vibrací, 9 – přenosný sběrač dat (datakolektor), 10 – připojení počítače, 11 – počítač s vyhodnocovacím software, 12 – tiskárna².

3.1 Snímače vibrací

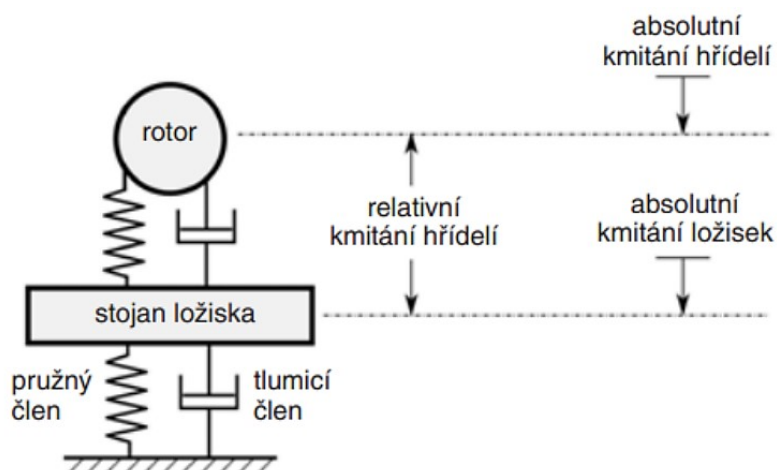
Pro stanovení mechanického kmitání a následného převodu na elektrickou veličinu, která je dále zesilována a zpracována, slouží snímače vibrací. Pro různé podmínky, metody měření a způsoby uložení, se používají různé typy snímačů vibrací. Dle principu se snímače dělí na elektrické, optické a mechanické. Dále se pak dají dělit dle dotyku s měřeným objektem na kontaktní a bezkontaktní. Zásadní rozdíly jsou v přesnosti, rozsahu frekvence, dynamickém rozsahu, hmotnosti, citlivosti,

pořizovací ceně a rozdíly v rezonančních vlastnostech³. Při stanovování mechanického kmitání by měl výstupní signál co nejpřesněji zachycovat skutečný průběh mechanického kmitání².

Základní rozdělení snímačů:

- seismická zařízení – připevňují se na základní konstrukci stroje či zařízení a výstupem je míra absolutních vibrací,
- snímače relativní výchylky – stanovují vibrační výchylku a střední polohu mezi rotujícími a statickými díly konstrukce³.

Absolutní vibrace jsou stanoveny pohybem sledovaného stroje či zařízení vzhledem k zemi. Relativní vibrace jsou stanoveny k uměle vytvořenému pevnému bodu. Jako základna se nejčastěji používá rám měřeného stroje, ve kterém je umístěn snímač³.



Obrázek 4 – Absolutní a relativní kmitý⁷

3.1.1 Akcelerometry

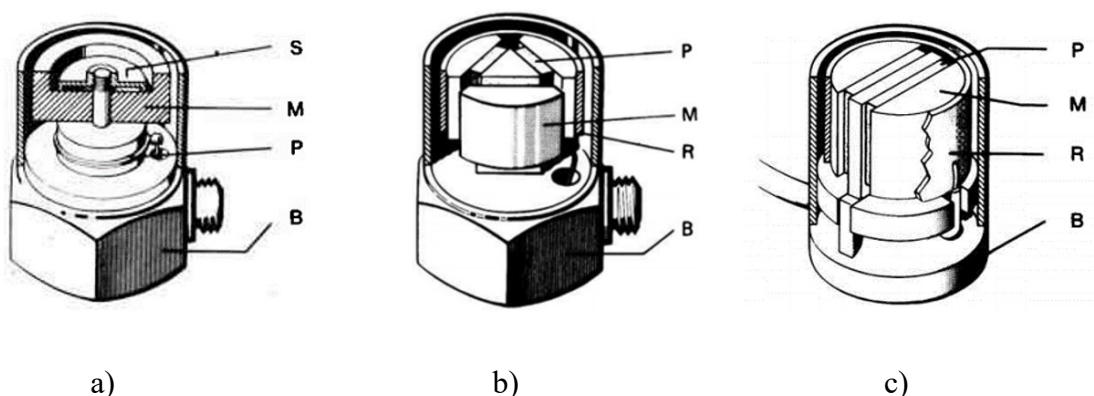
Jedná se o nejčastěji používané seismické snímače pro hodnocení stavu vibrací. Akcelerometry se instalují na stacionární část stroje a generují výstupní hodnoty úměrné mechanickému vibračnímu zrychlení. Výstupní hodnoty jsou zpracovány tak, aby bylo možné stanovit zrychlení, rychlost i výchylku vibrací³.

Matematický vztah mezi zrychlením (a), rychlostí (v) a výchylkou (y) vibrací je následující:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} \quad (1)$$

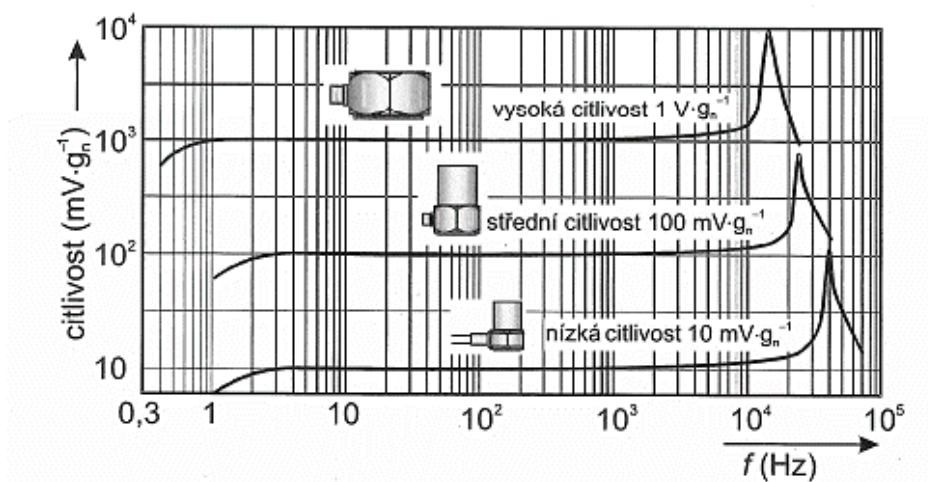
Akcelerometry jsou dostupné s různými rezonančními frekvencemi. Aby bylo zajištěno správné stanovení výsledků, musí být lineární rozsah instalovaných snímačů vyšší než rozsah sledovaných frekvencí ².

Kompaktní rozměry umožňují instalaci na poměrně malé objekty a celková odolnost konstrukce zaručuje použitelnost i ve vysokých teplotách a silných magnetických polích. Primárními členy konstrukce jsou piezoelektrické krystalové elementy, dle typu akcelometru se počet elementů může lišit. Konfigurace piezoelektrických krystalů rozděluje akcelerometry na tlakové a stříhové ⁴. U tlakové konfigurace působí přídavná hmota na piezoelektrický element tlakovými silami. U stříhové konfigurace působí přídavná hmota na piezoelektrický element stříhem. Detailní konstrukční uspořádání piezoelektrických akcelometrů je znázorněno na Obrázku 5. Akcelerometry s tlakovou konfigurací (a) se skládají ze základny (B), piezoelektrického členu (P), setrvačné hmoty (M) a pružiny (S). Akcelerometry se stříhovou konfigurací (b, c) se skládají ze základny (B), upínacího prstence (R), setrvačné hmoty (M) a piezoelektrického členu (P) ⁶.



Obrázek 5 – Uspořádání piezoelektrických akcelometrů Brüel & Kjær ⁶

Nejzásadnějším parametrem akcelometrů je citlivost neboli čitelnost přenosu. Citlivost je dána generovaným elektrickým signálem ze snímače. Síla signálu je úměrná velikosti piezoelektrického elementu. Dalším parametrem je velikost a s tím i spojená vlastní hmotnost snímače. Vysoká vlastní hmotnost snímače může zapříčinit zkreslení výsledků měření. Dle předpisu by neměla být vlastní hmotnost akcelometru vyšší než desetina dynamické hmotnosti měřeného objektu ⁵.

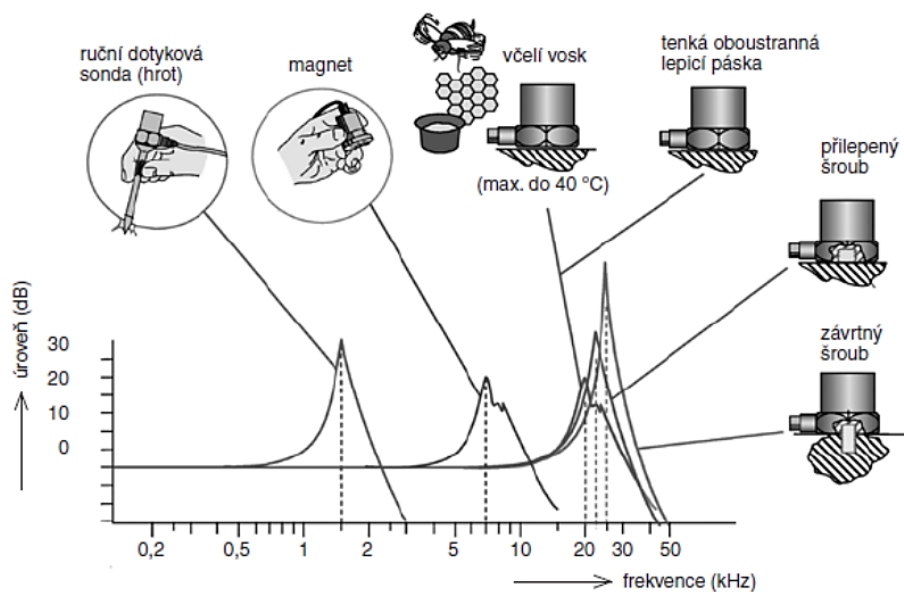


**Obrázek 6 – Typické frekvenční charakteristiky
pro různé citlivosti piezoelektrických akcelerometrů ⁷**

3.1.2 Připevnění snímačů

Připevnění snímačů lze realizovat více způsoby. Možnosti připevnění a vliv připevnění na výkonnost snímače s rezonanční frekvencí 30 kHz.

- Upevnění přes závrtný šroub – nedochází ke snížení rezonanční frekvence v důsledku připevnění snímače.
- Upevnění přes izolovaný závrtný šroub – elektrická izolace od objektu zabraňuje vzniku zemnicích smyček, pro izolaci je používán tuhý nevodivý materiál, například podložky ze slídy. Rezonanční frekvence je snížena přibližně na 28 kHz.
- Přilepení šroubu tuhým lepidlem – rezonanční frekvence je snížena přibližně na 28 kHz.
- Přilepení měkkým epoxidem, tenkou oboustrannou lepicí páskou, případně upevnění přes včelí vosk – rezonanční frekvence je snížena přibližně na 8 kHz.
- Upevnění permanentním magnetem – rezonanční frekvence je snížena přibližně na 7 kHz.
- Ruční sonda se snímačem – rezonanční frekvence je podstatně závislá na přítlaku snímače a na zkušenostech obsluhy. Tento způsob není vhodný při měření pohybujícím se nad 1 kHz ³.



Obrázek 7 – Vliv montáže akcelerometrů na frekvenční charakteristiky ⁸

3.2 Datakolektory a analyzátory

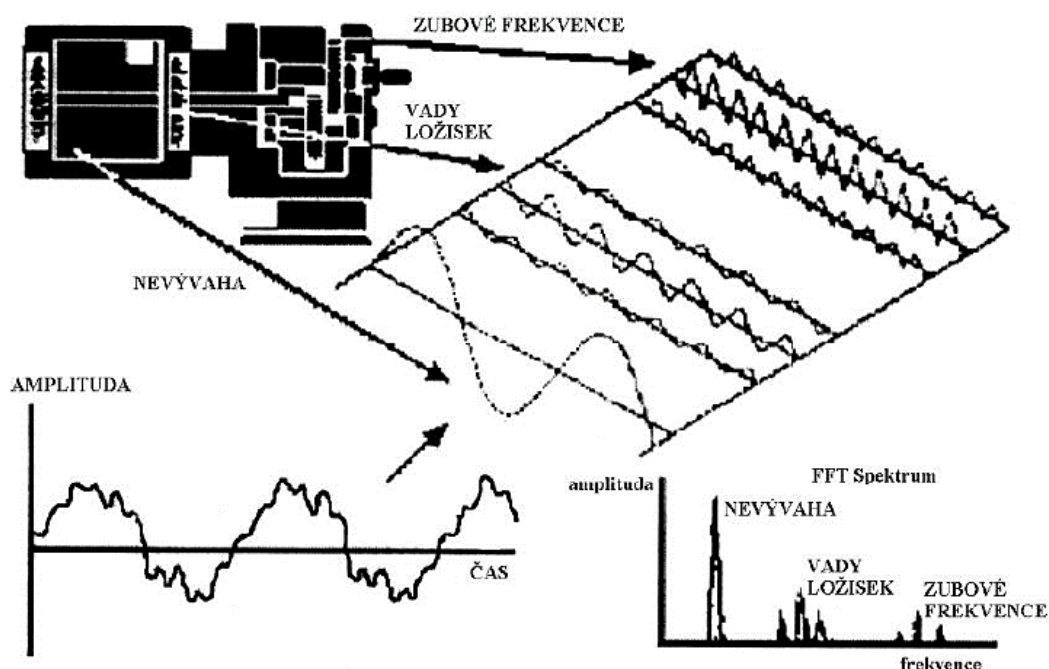
Datakolektory a analyzátory se v praxi používají pro vyhodnocení naměřeného signálu ze snímačů vibrací. Jejich princip spočívá v digitalizaci analogové veličiny neboli vzorkování a dalším matematickým zpracováním, za účelem získání daných vibračních charakteristik, které jsou obrazem mechanického chvění zařízení ⁴.

- Jednoduché analyzátory neboli vibrační pera – jednoduché zobrazení vibračních veličin dle ISO, případně stavu ložisek jako širokopásmová hodnota zrychlení vibrací ⁴.
- Datakolektor, analyzátor – výhoda ukládání dat, využití speciálních algoritmů pro zpracování vibračního signálu (různé druhy filtrů, FFT, HFFT, Envelop, Orbity, Oktávové analýzy, Bode diagram, Nyquist diagram, náběhy, doběhy a řádové analýzy) ⁴.

3.2.1 Rychlá Fourierova transformace

Rychlá Fourierova transformace neboli FFT (Fast Fourier transform) je nejpoužívanější analytická metoda, založená na hledání periodických dějů ve vibračních signálech. Využívá se při diagnostice strojů a zařízení s periodickým rotačním cyklem, ve kterých jsou vibrační signály vyvolány periodickými ději. Výstupní hodnoty jsou zobrazeny na zařízení pro monitorování vibrací formou tabulek a grafů. Zobrazení výstupních hodnot v grafu se dělí dle použitého souřadného systému.

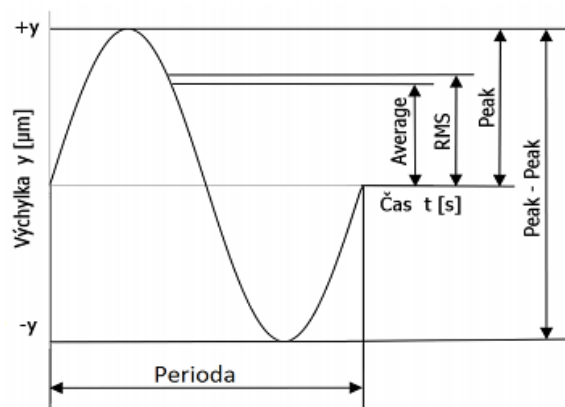
V případě, kdy je na osách vynesena amplituda a frekvence, jedná se o frekvenční spektrum. Pokud je na osách vynesena amplituda a čas, jedná se o časový průběh. Frekvenční spektrum rozkládá časový průběh signálu na množství sinusových signálů s určitou amplitudou a počáteční fází. Odchytky ve frekvenčním spektru jsou zásadním diagnostickým ukazatelem. Hlavní výhodou rychlé Fourierovy transformace je přesnost, rychlost, srozumitelné nastavení parametrů a realizovatelnost formou univerzálního elektrického obvodu ⁵.



**Obrázek 8 – Zobrazení vibrací soustrojí,
jejich skládání a zobrazení ve frekvenčním spektru ⁵**

Názvosloví používaná v časovém průběhu vibrací:

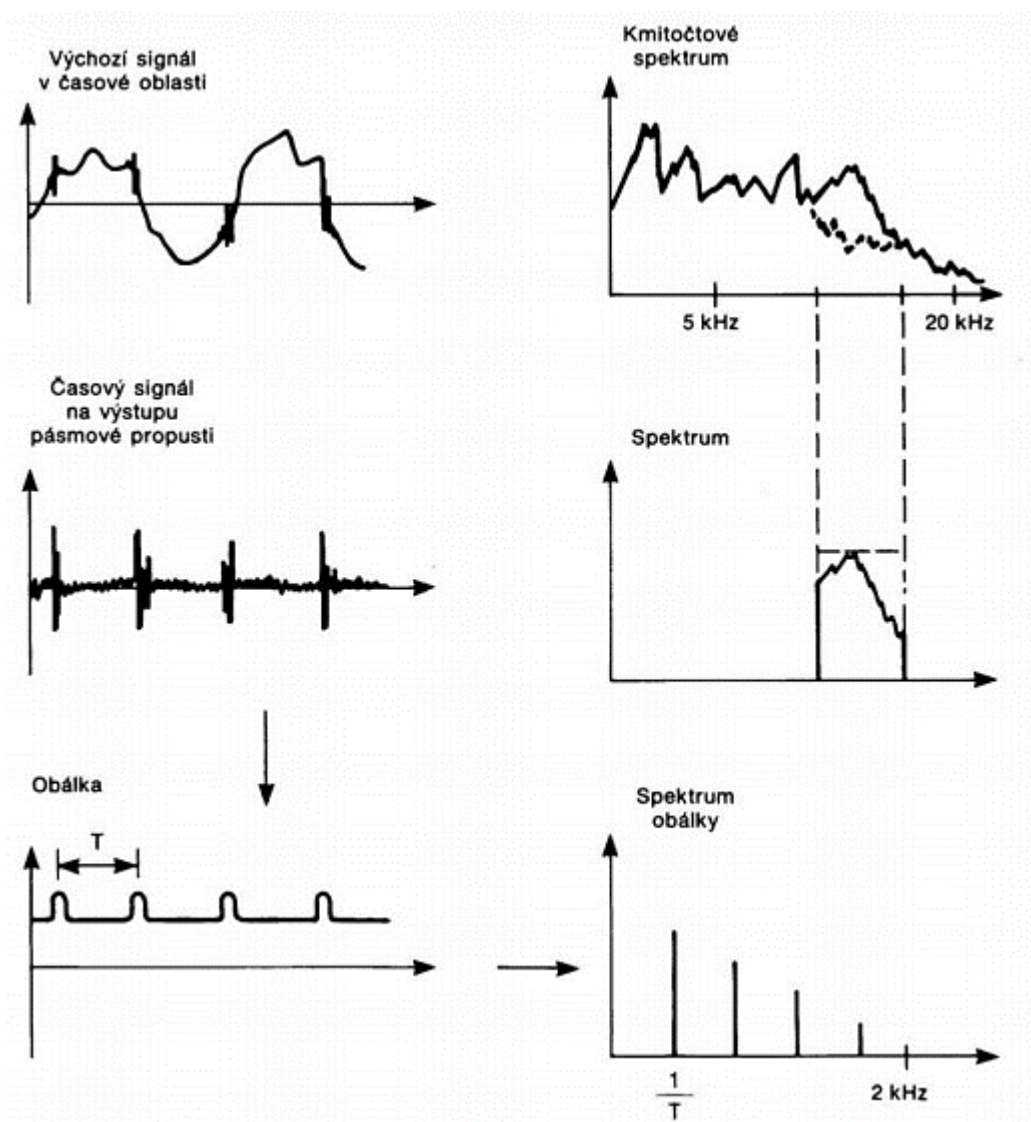
- špička (peak) – vzdálenost mezi nejvyšší hodnotou amplitudy a nulovou úrovní signálu,
- špička – špička (peak – to – peak) – vzdálenost mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou vlny,
- průměrná hodnota (average) – reálný sinusový průběh je nedokonalý, proto průměrná hodnota je nenulová,
- efektivní hodnota (RMS) – matematicky odvozená hodnota, jedná se o porovnání výkonu nebo energie stejnosměrného a střídavého proudu ³.



Obrázek 9 – Časová charakteristika s parametry vibrací ⁷

3.2.2 Obálková analýza

Obálková analýza neboli demodulace je analýza umožňující detekci poškození ložisek a poškození záběru ozubených kol. Tento druh poškození vytváří vibrační signály s velmi malou amplitudou a vysokou frekvencí. Analýza je založena na zvýraznění malých signálů dvoustupňovým procesorem. V první fázi se prostřednictvím pásmového filtrování oddělí ložiskové signály s vyšší frekvencí od nízkofrekvenčních vibrací. Výstupem je série špiček, které odpovídají rázům od průchodu jednotlivých elementů přes poškození. Rázový impuls je ve velmi úzkém časovém oboru. Amplitudy harmonických složek frekvence poškození jsou překryty šumem. V kombinaci s rychlou Fourierovou transformací spektra signálu lze stanovit poruchové frekvence a harmonické složky ².



Obrázek 10 – Ilustrace základního principu detekce a analýzy obálky ⁹

4 Možné vibrační chování ventilátorů

Mezi možné vibrační chování ventilátorů patří nevyváha, nesouosost, mechanické uvolnění a ložiskové poškození.

4.1 Nevývaha

Nevývaha je způsobena hmotou, která je nesouměrně umístěna mimo osu rotace. Následkem nevyvahy je vznik mechanického kmitání, které má za následek dynamické namáhání a razantní zkrácení životnosti stroje. Rychlost vibrací způsobených nevyvahou je výrazně závislá na otáčkách, respektive stoupá s kvadrátem otáček. To znamená, že při zdvojnásobení otáček se hodnota vibrací zvýší až na čtyřnásobek. Z toho důvodu je nezbytné brát v úvahu pracovní otáčky stroje ³.

Výrobní a montážní příčiny nevyváženosti rotujících objektů:

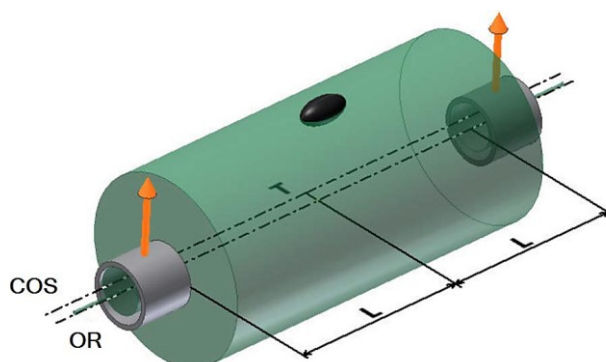
- výrobní úchytky a nesouososti rotačních ploch,
- trvalé deformace součástí,
- nerovnoměrná hustota materiálu,
- nekruhovitost ložiskových čepů,
- neobrobené plochy ².

Funkční příčiny nevyváženosti rotujících objektů:

- vzájemné uvolnění a deformace částí rotoru,
- nerovnoměrné opotřebení rotoru,
- kinematické příčiny a příčiny z funkce stroje ².

4.1.1 Statická nevyváženost

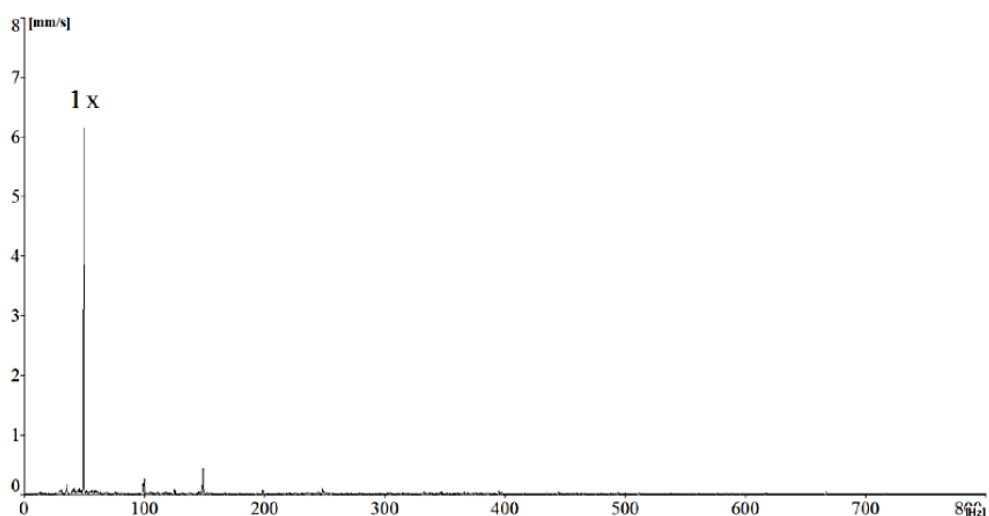
Statická nevyváženost (viz Obrázek 11) je způsobena paralelním posunutím centrální osy setrvačnosti (COS) vůči ose rotace (OR), přičemž velikost posunutí os je rovna posunutí těžiště rotoru. Centrální osa setrvačnosti zachovává vzájemnou rovnoběžnost s osou rotace. Statickou nevyváženost je možné stanovit při umístění podpěr s minimálním třením do osy rotace. Nevývaha se při otočení nachází v nejnižším bodě rotoru. Nejčastější výskyt je u rotorů, které mají průměr podstatně větší než šířku ⁵.



Obrázek 11 – Statická nevyváženost ⁵

Projev ve frekvenčním spektru vibrací

Projev statické nevyváženosti se vyznačuje výraznou amplitudou na otáčkové frekvenci v radiálním směru na ložiskách s nulovým nebo fázovým posuvem ($\pm 30^\circ$). Dominantní amplituda se nachází na základní rotorové frekvenci. Mezi horizontálním a vertikálním směrem je fázový rozdíl přibližně 90° ($\pm 30^\circ$). Přítomnost harmonických násobků otáčkové frekvence je ukazatelem vysoké nevyváženosti nebo vymezování vůlí v ložiskách ⁵.

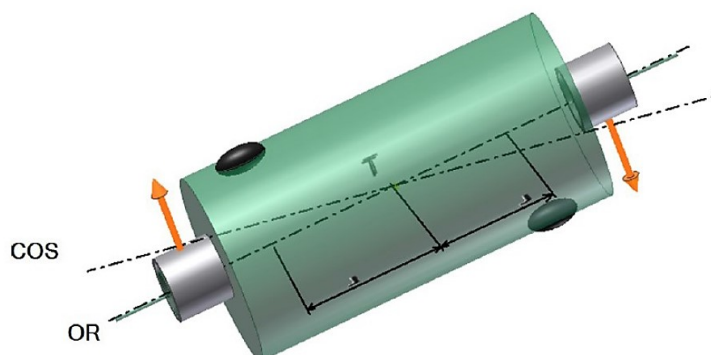


**Obrázek 12 – Příklad frekvenčního spektra
s nevyváhou statickou či momentovou ⁵**

4.1.2 Momentová nevyváženost

Momentová nevyváženost (viz Obrázek 13) je způsobena různoběžným uspořádáním osy rotace (OR) a centrální osy setrvačnosti (COS). Osy se vzájemně protínají v těžišti rotoru. Momentovou nevyváženost nelze stanovit v klidovém stavu, jelikož v klidovém stavu se rotor jeví jako vyvážený. Nevývaha se projevuje až při

otáčení rotoru, kdy dvojice setrvačných sil, vzniklých od nevyvážků na rotoru, způsobuje momentové namáhání a následkem toho rotor vibruje. Naměřené hodnoty fáze na koncích hřídele jsou vzájemně posunuty o 180° ⁵.



Obrázek 13 – Momentová nevyváženost ¹⁰

Projev ve frekvenčním spektru vibrací

Projev momentové nevyváženosti je obdobný jako projev statické nevyváženosti ⁵.

4.1.3 Dynamická nevyváženost

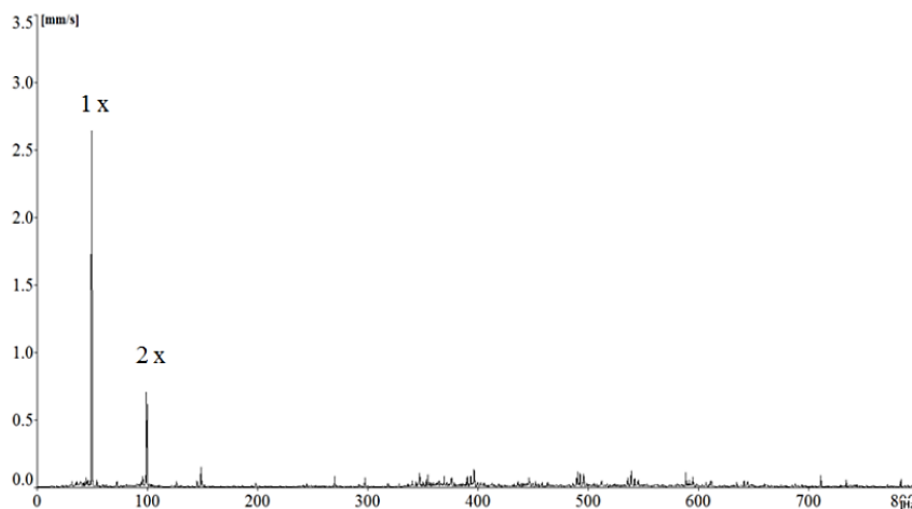
Dynamická nevyváženost (viz Obrázek 14) se skládá z kombinace statické a momentové nevyváženosti. U jednoduchých strojních konstrukcí převládá statická nevyváženost, jedná-li se o složitější konstrukci významněji se projevuje momentová nevyváženost. K protnutí centrální osy setrvačnosti (COS) a osy rotace (OR) dochází mimo těžiště rotoru. Při vyvažování se nejprve odstraňuje statická a následně momentová nevyváženost ⁵.



Obrázek 14 – Dynamická nevyváženost ⁵

Projev ve frekvenčním spektru vibrací

Projev dynamické nevyváženosti se vyznačuje výraznou amplitudou na otáčkové frekvenci v radiálním směru na ložiskách. Velká nevyváženost způsobuje amplitudu na druhém násobku otáčkové frekvence. Fázový rozdíl vibrací v horizontálním směru na vnějším a vnitřním ložisku se pohybuje od 0° do 180° . Fázový rozdíl ve vertikálním a horizontálním směru musí být shodný ⁵.



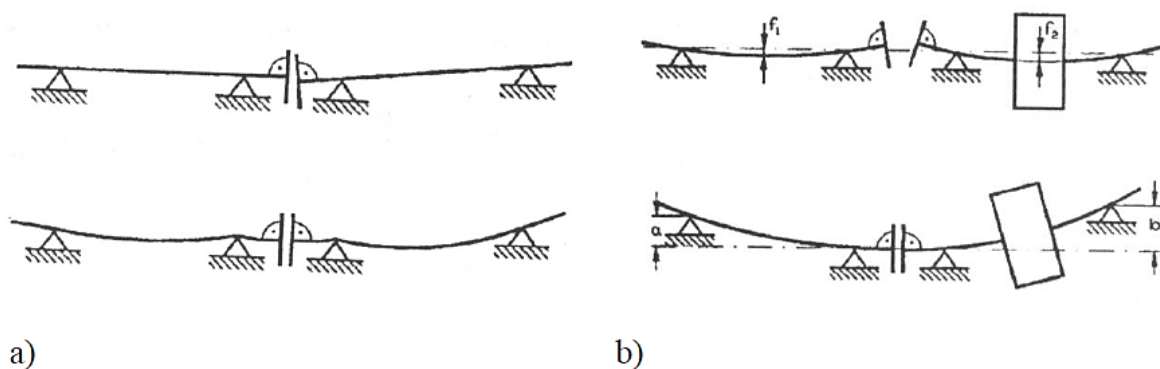
Obrázek 15 – Příklad frekvenčního spektra s dynamickou nevyvážeností ⁵

4.2 Nesouosost

Nesouosost je způsobena zanedbáním předpokladů správného ustavení. Následkem nesouososti je vznik mechanického kmitání, které způsobuje dynamické namáhání a razantní zkrácení životnosti stroje ².

Příčiny nesouososti při ustavování spojky:

- násilné spojení paralelně a úhlově přesazených spojkových kotoučů,
- průhyb vlastní vahou při násilném spojení spojkových kotoučů ².



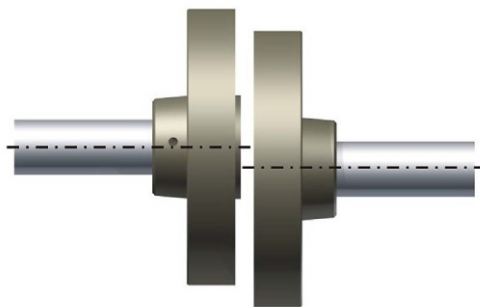
Obrázek 16 – Možné příčiny nesouososti

a) násilné spojení paralelně a úhlově přesazených spojkových kotoučů

b) průhyb vlastní vahou při násilném spojení spojkových kotoučů ²

4.2.1 Rovnoběžná nesouosost

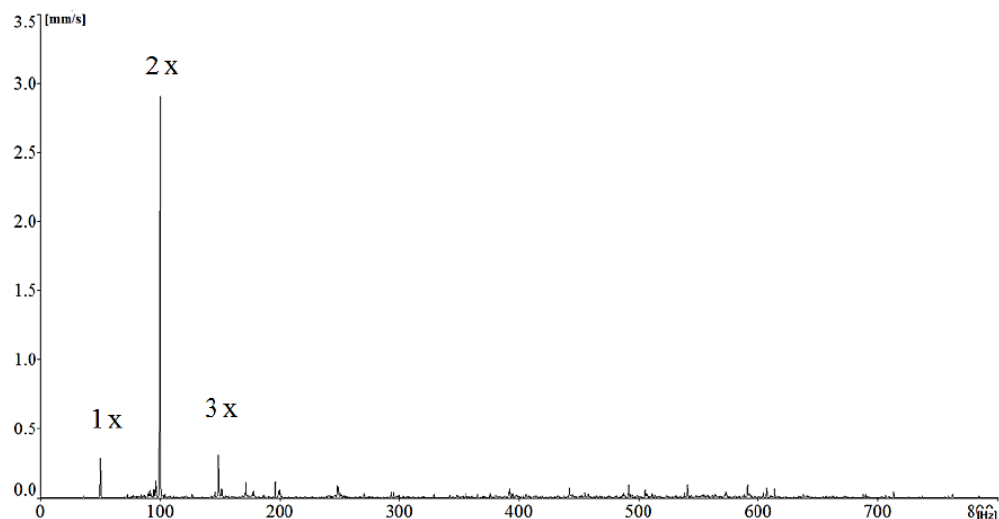
Následující Obrázek 17 znázorňuje rovnoběžnou nesouosost. Osy hřídelů jsou vzájemně rovnoběžné. Rovnoběžná nesouosost způsobuje zvýšení radiálních vibrací. Projev ve frekvenčním spektru vibrací se vyznačuje výrazným druhým násobkem harmonické otáčkové frekvence, která často nabývá hodnot vyšších než první harmonická otáčková frekvence. Výraznější přesazení hřídele generuje ve frekvenčním spektru amplitudy se čtvrtým až osmým harmonickým násobkem ³.



Obrázek 17 – Rovnoběžná nesouosost při rovnoběžném přesazení hřídelů ⁵

Projev ve frekvenčním spektru vibrací

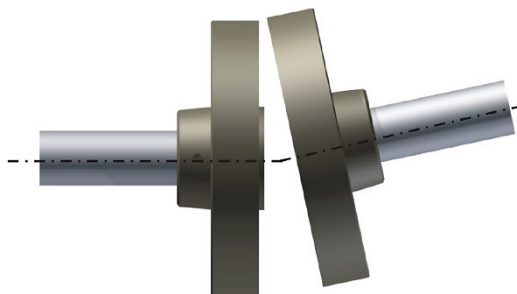
Obrázek 18 zobrazuje typický projev rovnoběžné nesouososti v radiálním směru.



Obrázek 18 – Typický projev rovnoběžné nesouososti v radiálním směru s vyznačením otáčkové složky ve frekvenčním spektru ³

4.2.2 Úhlová nesouosost

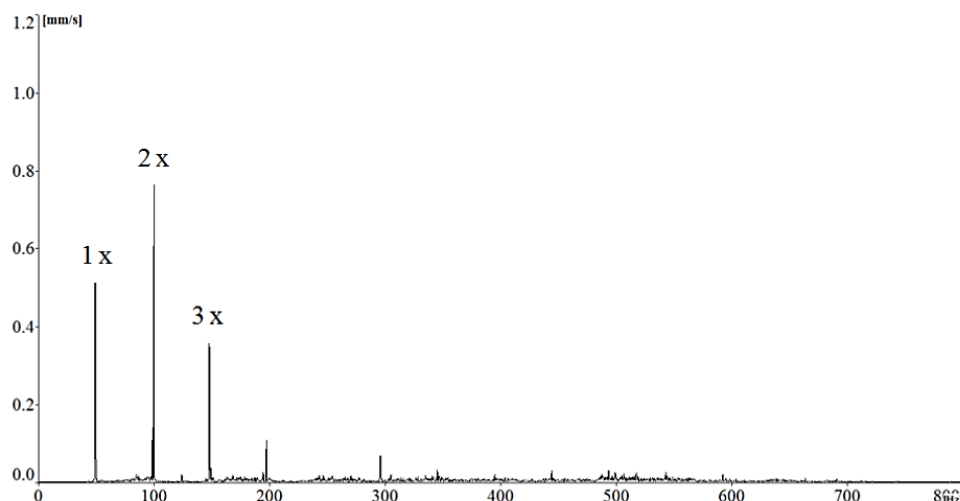
Následující Obrázek 19 znázorňuje úhlovou nesouosost. Osy hřídelů se vzájemně protínají. Úhlová nesouosost způsobuje zvýšení axiálních vibrací. Ve frekvenčním spektru vibrací se výrazně projevuje amplituda první, druhé i třetí harmonické otáčkové frekvence ³.



Obrázek 19 – Úhlová nesouosost ⁵

Projev ve frekvenčním spektru vibrací

Obrázek 20 zobrazuje typický projev úhlové nesouososti v axiálním směru.



**Obrázek 20 – Typický projev úhlové nesouososti v axiálním směru
s vyznačením otáčkové složky ³**

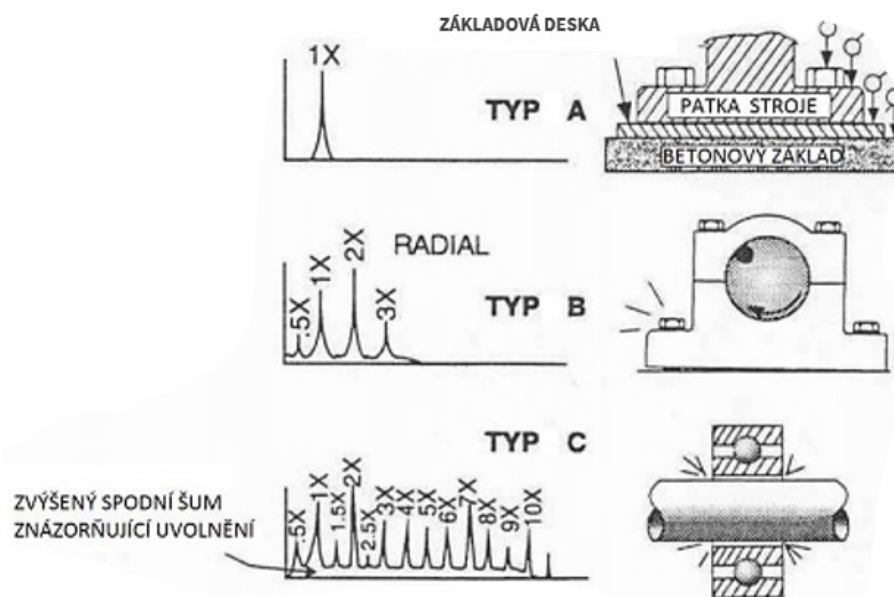
4.3 Mechanické uvolnění

Mechanické uvolnění lze rozdělit dle projevu ve frekvenčním spektru na typ A, typ B a typ C.

Mechanické uvolnění typu A (Typ A) je zapříčiněno uvolněním, deformací nebo nedostatečnou tuhostí patek stoje, dále uvolněním základových šroubů, strukturním uvolněním základového rámu nebo samotného základu ¹⁰.

Mechanické uvolnění typu B (Typ B) je zapříčiněno uvolněním šroubů ložiskového stojanu, dále trhlinami v ložiskovém stojanu nebo trhlinami v konstrukci rámu ¹⁰.

Mechanické uvolnění typu C (Typ C) je zapříčiněno nesprávným lícováním mezi komponenty. Především se jedná o uvolnění pouzdra ložiska ve víku, volné a protáčeující se ložisko na hřídeli, nadměrné vůle v kluzném či valivém ložisku nebo o volné oběžné kolo na hřídeli. Mechanické uvolnění typu C se projevuje ve frekvenčním spektru ořezanou časovou vlnou a zvýrazněným prahem šumu ve spektru ¹⁰.



Obrázek 21 – Typy mechanických uvolnění ¹⁰

4.4 Ložiskové poškození – Valivá ložiska

Při včasné detekci poruchy, jako je neadekvátní mazání a nesouosost, lze aplikovat proaktivní opatření pro prodloužení trvanlivosti ložiska. Zhoršený stav ložiska lze detekovat již ve stavu, kdy se začínají valivé dráhy opotřebovávat a v zatížené oblasti se začíná objevovat mikropitting. Výskyt mikropittingu v začínajícím stadiu nemusí vždy znamenat zkrácení provozní životnosti ložiska, ale velmi často indikuje rozvoj závad první etapy². Vývoj jednotlivých etap poškození je znázorněn na Obrázku 22.

První etapa – A

V první etapě je ložisko stále plně provozuschopné. Nicméně se nachází v pokročilém stadiu životního cyklu. Vznikající mikropitting zhoršuje stav ložiska. Zhoršení spočívá ve vzniku velmi malých kráterů na valivých drahách ložiska. Při detekci se může projevit nedostatečná síla od nárazu elementu na kráter. Následkem je generování velmi nízkého vibračního signálu v oboru zrychlení vibrací. Projev první etapy v FFT spektru se vyznačuje viditelnými harmonickými násobky frekvence závady².

Druhá etapa – B

V druhé etapě je ložisko opotřebené. Velikost opotřebení se však nachází v přípustných mezích a zatím není nutná výměna ložiska. Vzniklé opotřebení,

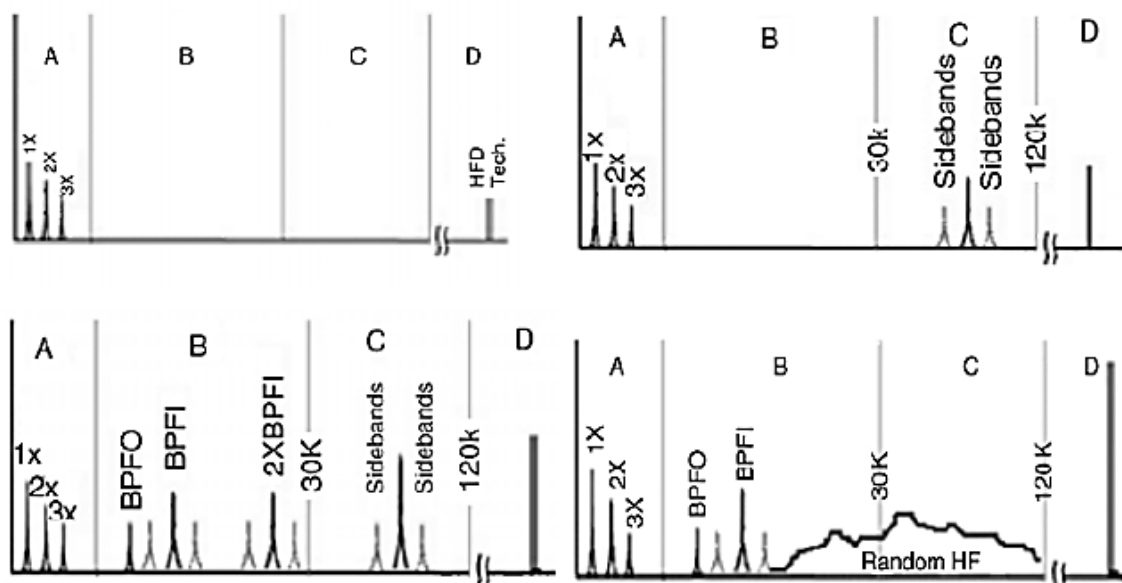
především nepatrné mikrosvary, se nachází na valivých drahách ložiska. Vývoj stavu ložiska je v první fázi lineární, což umožňuje stanovení trendu a predikce životnosti. Se zkracující se životností se však průběh stává nelineárním. Projev druhé etapy v FFT spektru se vyznačuje výraznými harmonickými násobky. S rostoucí amplitudou harmonických složek je doporučeno zvýšení četnosti sběru dat ².

Třetí etapa – C

Ve třetí etapě se životnost ložiska dostává do závěrečné fáze a ložisko by mělo být v nejbližším možném termínu vyměněno. Detekované závady lze rozdělit dle generovaného signálu na BPFI, BPFO, BSF a FTF. Signál BPFI (Ball Pass Frequency Inner Race) neboli frekvence poškození vnitřního kroužku ložiska. Signál BPFO (Ball Pass Frequency Outer Race) neboli frekvence poškození vnějšího kroužku ložiska. Signál BSF (Ball Spin Frequency) neboli frekvence poškození valivých elementů ložiska. Signál FTF (Fundamental Train Frequency) neboli frekvence poškození klece ložiska. Projev třetí etapy v FFT spektru se vyznačuje výraznou základní frekvencí a harmonickými násobky s náznakem postranního pásma (Sidebands) s otáčkovou frekvencí hřídele ².

Čtvrtá etapa – D

Ve čtvrté etapě je životnost ložiska extrémně krátká a je vyžadována okamžitá výměna ložiska. Projev čtvrté etapy v FFT spektru se vyznačuje širokopásmovým vysokofrekvenčním šumem (Random HF) v oblasti frekvencí závad ložiska. Poškození se dále projevuje hlukem ².



Obrázek 22 – Průběh postupného poškození ložiska

v časovém signálu zrychlení vibrací ¹⁰

5 ROCKWOOL, a.s.

Společnost ROCKWOOL, a.s. sídlí v Dánsku a je světovým lídrem v oblasti výroby produktů z kamenné vlny. Společnost byla založena v roce 1909. V současné době působí v 38 zemích světa, kde provozuje 40 výrobních závodů. Celosvětově společnost ROCKWOOL, a.s. zaměstnává 10 800 kvalifikovaných pracovníků. Produkty jsou vytvářeny s ohledem na potřeby současného světa. Primární produkce je zaměřena na systémové řešení stavebních izolací, řešení interiérové akustiky, vnější obkladové systémy a využití izolací ve zpracovatelském, automobilovém a lodním průmyslu ¹¹.

V České republice působí společnost ROCKWOOL, a.s. od roku 1993. Výrobní závod v Bohumíně započal produkci kamenné vlny roku 1998. V současné době výrobní závod zaměstnává přibližně 250 pracovníků. Produkce závodu je zaměřena především na pokročilé stavební a technické izolace v průmyslových objektech. České zastoupení společnosti je zároveň evropským centrem technických izolací ROCKWOOL, a.s. ¹¹.

5.1 Heistech, s.r.o.

Společnost Heistech, s.r.o. se zaměřuje na oblast prediktivní údržby aplikací metod technické diagnostiky za účelem identifikace aktuálního stavu strojních zařízení. Společnost Heistech, s.r.o. rovněž zajišťuje dodávky online systémů měření vibrací a procesních parametrů, včetně vizualizace dle stanovených požadavků. V roce 2016 se společnost Heistech, s.r.o. stala integrátorem společnosti ifm electronic, spol. s r.o. v oblasti prediktivní diagnostiky ¹².

Společnost Heistech, s.r.o. poskytuje komplexní služby v následujících oborech bezdemontážní technické diagnostiky:

- vibrodiagnostika – měření vibrací a frekvenční analýza,
- online monitorovací systémy – kontinuální měření vibrací a procesních parametrů,
- hluková diagnostika – měření hluku,
- tribodiagnostika – rozborů olejů,
- termodiagnostika – měření teplotních polí termokamerou,

- expertní analýzy – řešení vibračních problémů, návrhy snižování hluku,
- garanční měření ¹².

Dále také nabízí servisní činnosti a konzultační služby v oblasti technické diagnostiky a prediktivní údržby.

Společnost Heistech, s.r.o. zajišťuje ve společnosti ROCKWOOL, a.s., konkrétně ve výrobním závodě v Bohumíně, komplexní služby v oboru bezdemontážní technické diagnostiky již od roku 2016.

Zmíněné služby zajišťují vysoce kvalifikovaní pracovníci, kteří mají již patnáctileté zkušenosti nejen v oblasti vibrační diagnostiky, ale také v oblastech teorie kmitání a vibrací, které dokáží spolehlivě uplatnit v praxi. Jsou držiteli certifikátů vibrační diagnostiky ¹².

6 Návrh měřicí metodiky a používaná přístrojová vybavení

Měření jsou prováděna monitorovací technologií firmy ADASH spol. s r.o. Metodika měření vibrací a zpracování protokolu je v souladu s normou ČSN 10 816– 3 a ČSN 14 694 pro průmyslové stroje a ventilátory.

6.1 Používaná přístrojová vybavení

- **Snímač vibrací** – typ A102-1A, jedná se o akcelerometr s napěťovým výstupem a citlivostí 100 mV/g, výrobní číslo akcelerometru 2776 ¹³.



Obrázek 23 – Akcelerometr A102-1A ¹³

- **Frekvenční analyzátor** – datakolektor ADASH VA3 Pro, sérové číslo 628735. Jedná se o datakolektor s frekvenčním rozsahem 0,5 Hz až 25 kHz (64 kHz vzorkování) a FFT rozlišením 25 až 25 600 čar, který lze použít jako analyzátor, sběrač dat, vibrometr nebo při vyvažování a podobně ¹⁴.



Obrázek 24 – Datakolektor ADASH VA3 Pro ¹⁴

- **Vyhodnocení spekter FFT** – realizace pomocí softwaru DDS 2018, vyvinutého společností ADASH spol. s r.o. a softwaru Emonitor-Rockwell Automation vyvinutého společností ENTEK IRD international ¹⁵.

Přístrojové vybavení je pravidelně kalibrováno v souladu s normou ČSN ISO 16 063- 21:2004.

6.2 Dlouhodobý přehled technického stavu ventilátorů s aplikovanou vibrační diagnostikou

Hodnocení stavu zařízení je provedeno na základě měření rychlosti vibrací v jednotlivých měřicích bodech, které je následně porovnáno s platnými normami ČSN 10 816-3 a ČSN 14 694. Stav ložisek je objektivně hodnocen na základě měření zrychlení a obálky zrychlení vibrací. Všechny měřené vibrační signály následně podléhají frekvenční analýze rozborem FFT spekter, kde je cílem identifikovat budící síly, které jsou obrazem poškození a nedostatků.

Tabulka 1 – Pásmové hodnocení technického stavu zařízení ⁴

Mezní hodnoty rychlosti vibrací RMS [mm · s ⁻¹]			
Norma ČSN 10 816-3	A/B	B/C	C/D
Tab. A.1, uložení tuhé	2,3	4,5	7,1
Mezní hodnoty rychlosti vibrací RMS [mm · s ⁻¹]			
Norma ČSN 14 694	A/B	B/C	C/D
BV3, uložení tuhé	4,5	7,1	9,0
Pásmo A	Pásmo vibrací nových strojů, nebo strojů po generální opravě		
Pásmo B	Pásmo vibrací pro neomezenou dobu provozu stroje		
Pásmo C	Pásmo vibrací považováno za neuspokojivé pro dlouhodobý provoz		
Pásmo D	Pásmo vibrací považováno za nebezpečné a může způsobit havárii stroje		
Hodnocení stavu ložisek			
Provozní	Zhoršený	Havarijní	

Tabulka 2 – Přehled vývoje technického stavu ventilátorů za rok 2017 ⁴

	únor	březen	květen	září	listopad	prosinec
Chimney Fan	-	●	●	●	●	●
Heating room fan stage 1	-	●	●	●	●	●
Heating room fan stage 2	-	●	●	●	●	●
Curing Vapour fan PSM1	-	●	-	-	-	-
Cold suction fan PSM1	-	●	-	-	-	-
Mlýn-kamenitá vlna	-	●	●	●	●	●
Ventilátor Schotter u mlýna	-	●	●	●	●	●
Ventilátor V4 spalínový	-	●	●	●	●	●
Digestor hood fan	-	●	●	●	●	-
Ventilátor cirkulační	●	●	●	●	●	●
Pravý ventilátor RS	-	●	●	●	●	-
Levý ventilátor RS	-	●	●	●	●	-
Ventilátor chladič zóny	-	●	●	●	●	-
Ventilátor V2 foukání do pece	-	●	●	●	●	-
Ventilátor Moldow-LINE	-	●	●	●	●	●
Ventilátor V5 podtlak ve filtru	-	●	●	●	●	-
SPC ventilátor	●	-	●	●	●	●
Ventilátor V3	-	-	●	●	●	-
Ventilátor 16 ohřev horního pásu	-	●	●	●	●	●
Ventilátor 17 odtah spalin horního pásu	-	●	●	●	●	-
Ventilátor V7 odtah spalin z komory	-	●	●	●	●	●
Ventilátor V1 chladič vzduch rekuperátor	-	●	●	●	●	-

Podrobná vyhodnocení technického stavu jednotlivých ventilátorů, včetně popisu diagnostikovaných poškození, jsou obsahem samostatných zpráv z měření vibrací ventilátorů.

Tabulka 3 – Přehled vývoje technického stavu ventilátorů za rok 2018 ⁴

	leden	únor	duben	červen	září
Chimney Fan	-	●	●	-	●
Heating room fan stage 1	●	●	●	●	●
Heating room fan stage 2	●	●	●	●	●
Curing Vapour fan PSM1	-	-	-	-	-
Cold suction fan PSM1	-	-	-	-	-
Mlýn-kamenitá vlna	●	●	●	-	●
Ventilátor Schotter u mlýna	●	●	●	●	-
Ventilátor V4 spalínový	-	●	●	-	●
Digestor hood fan	-	●	●	-	-
Ventilátor cirkulační	●	●	●	●	●
Pravý ventilátor RS	-	●	●	-	●
Levý ventilátor RS	-	●	●	-	●
Ventilátor chladicí zóny	●	●	●	-	●
Ventilátor V2 foukání do pece	-	●	●	-	●
Ventilátor Moldow-LINE	●	●	●	-	●
Ventilátor V5 podtlak ve filtru	-	●	●	-	●
SPC ventilátor	●	●	●	-	●
Ventilátor V3	-	●	●	-	●
Ventilátor 16 ohřevu horního pásu	●	●	●	●	●
Ventilátor 17 odtah spalin horního pásu	●	●	●	-	●
Ventilátor V7 odtah spalin z komory	●	●	●	-	●
Ventilátor V1 chladicí vzduch rekuperátor	-	●	●	-	●

Podrobná vyhodnocení technického stavu jednotlivých ventilátorů, včetně popisu diagnostikovaných poškození, jsou obsahem samostatných zpráv z měření vibrací ventilátorů.

Tabulka 4 – Přehled vývoje technického stavu ventilátorů za rok 2019 ⁴

	leden	březen
Chimney Fan	●	●
Heating room fan stage 1	●	●
Heating room fan stage 2	●	●
Curing Vapour fan PSM1	-	-
Cold suction fan PSM1	-	-
Mlýn-kamenitá vlna	●	●
Ventilátor Schotter u mlýna	●	●
Ventilátor V4 spalínový	●	●
Digestor hood fan	-	-
Ventilátor cirkulační	●	●
Pravý ventilátor RS	●	●
Levý ventilátor RS	●	●
Ventilátor chladič zóny	●	●
Ventilátor V2 foukání do pece	●	●
Ventilátor Moldow-LINE	●	●
Ventilátor V5 podtlak ve filtru	●	●
SPC ventilátor	●	●
Ventilátor V3	●	●
Ventilátor 16 ohřev horního pásu	●	●
Ventilátor 17 odtah spalin horního pásu	●	●
Ventilátor V7 odtah spalin z komory	●	●
Ventilátor V1 chladič vzduch rekuperátor	●	●

Podrobná vyhodnocení technického stavu jednotlivých ventilátorů, včetně popisu diagnostikovaných poškození, jsou obsahem samostatných zpráv z měření vibrací ventilátorů.

7 Analýza příčin poškození ventilátorů

Jedná se o souhrn detekovaných nedostatků včetně analýzy FFT spekter za účelem stanovení příčin poškození a specifikování budicích sil, které jsou obrazem daného poškození. Výsledkem je návrh na odstranění poškození a doporučení vhodných opatření proti opětovnému poškození.

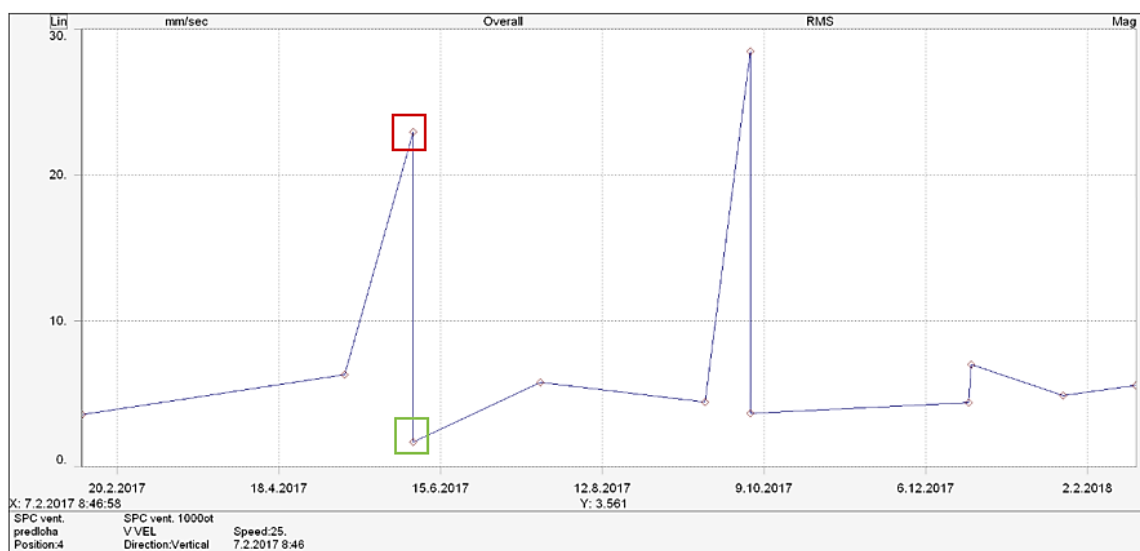
7.1 Nevývaha

Analýzou naměřených hodnot z pochůzkového měření na ventilátoru s označením SPC byla zjištěna značná nevývaha oběžného kola.



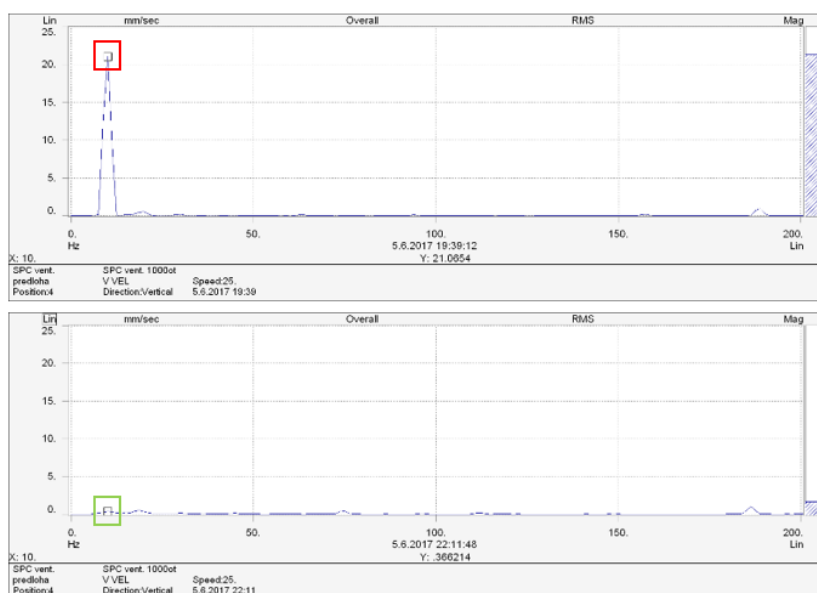
**Obrázek 25 – SPC ventilátor, jmenovitý výkon elektromotoru 1 MW,
průměr oběžného kola 3,6 metru**

Z trendu vývoje rychlosti vibrací ložiska předlohy L4 ve vertikálním směru (viz Obrázek 26) je patrný významný nárůst hodnot rychlosti vibrací v období 18. 4. 2017 až 15. 6. 2017, obdobný vývoj hodnot je viditelný i následně po přibližně čtyřech měsících. Tento nárůst je způsoben nabalením nečistot na oběžné kolo ventilátoru z důvodu špatné činnosti filtračního zařízení. V rámci vyčištění oběžného kola bylo provedeno i vyvážení, což je patrné především v prudkém poklesu hodnot vibrací.



**Obrázek 26 – Trend vývoje rychlosti vibrací ložiska předlohy L4
ve vertikálním směru**

Trend vývoje rychlosti vibrací ložiska předlohy L4 ve vertikálním směru za časové období od 20. 2. 2017 do 2. 2. 2018. V trendu je vyznačen stav před vyčistěním a následně po vyčistění a vyvážení oběžného kola.



**Obrázek 27 – Spektrum FFT rychlosti vibrací v RMS ložiska předlohy L4
ve vertikálním směru před a po vyčistění a vyvážení oběžného kola**

V FFT spektru rychlosti vibrací (viz Obrázek 27) je patrná dominantní diskretní amplituda na frekvenci 10 Hz o velikosti 21 mm/s, jenž je obrazem nevývahy oběžného kola. Po očištění a vyvážení došlo k výraznému poklesu amplitudy na 0,63 mm/s.

Návrh na odstranění příčin poškození

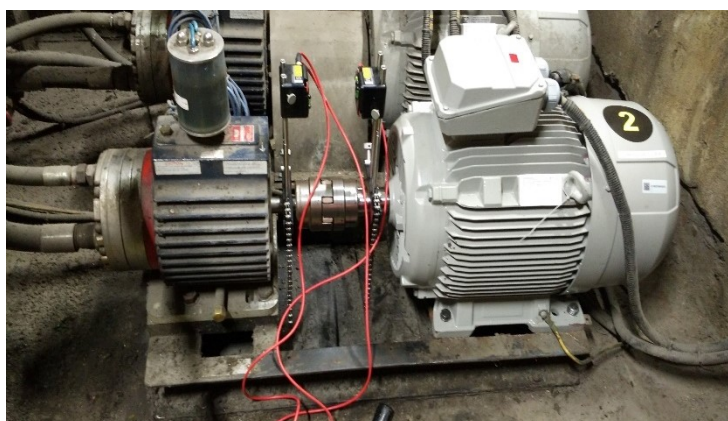
Bylo navrženo provádění pravidelných kontrol filtračního zařízení a zajištění pravidelného čištění oběžného kola otryskáním či opískováním. Případné termíny lze upravit dle potřeby s ohledem na zamezení překročení limitů stanovených normou ISO.

Výsledek návrhu na odstranění příčin poškození

Po zavedení série doporučení byl problém s nevývahou oběžného kola zcela vyřešen.

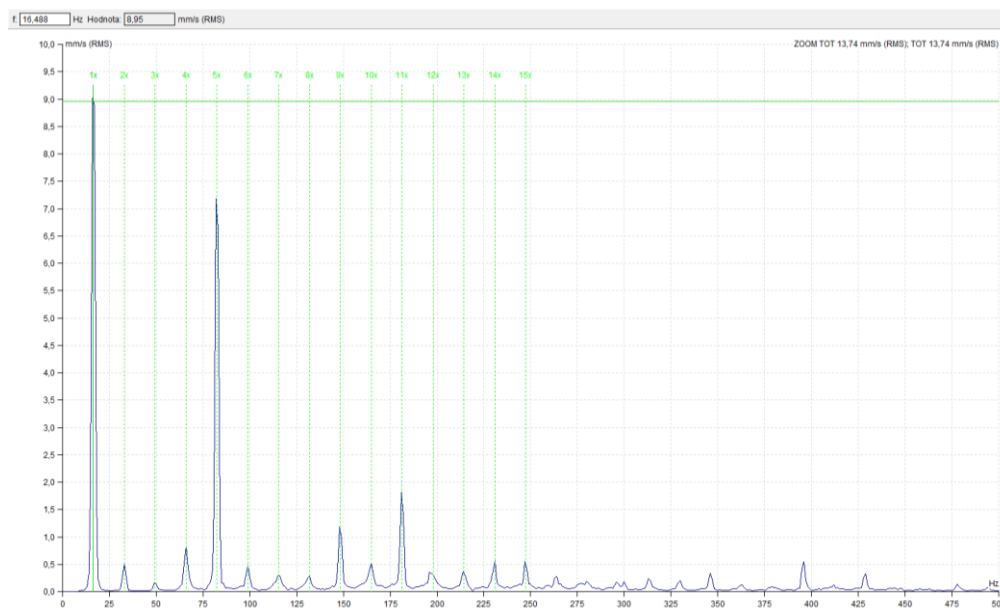
7.2 Nesouosost

Analýzou prvotního měření vibrací na zařízení s označením Čerpadlo 2, byla detekována nesouosost spojky a celkově její zhoršený stav. Příčinou poruchy bylo špatné ustavení spojky, které vzniklo při demontáži a opětovné montáži v rámci výměny elektromotoru a ložisek předlohy.



Obrázek 28 – Čerpadlo 2

V FFT spektru rychlosti vibrací ložiska předlohy L4 v axiálním směru (viz Obrázek 29) je výrazně dominantní amplituda na otáčkové frekvenci 16,6 Hz se zřetelným 5X harmonickým násobkem. To je způsobeno odezvou od značné nesouososti a také od poškození pružných členů rotexové spojky. Tudíž se jedná o špatné ustavení motoru vůči předloze.



Obrázek 29 – FFT spektrum rychlosti vibrací ložiska předlohy L4

Návrh na odstranění příčin poškození

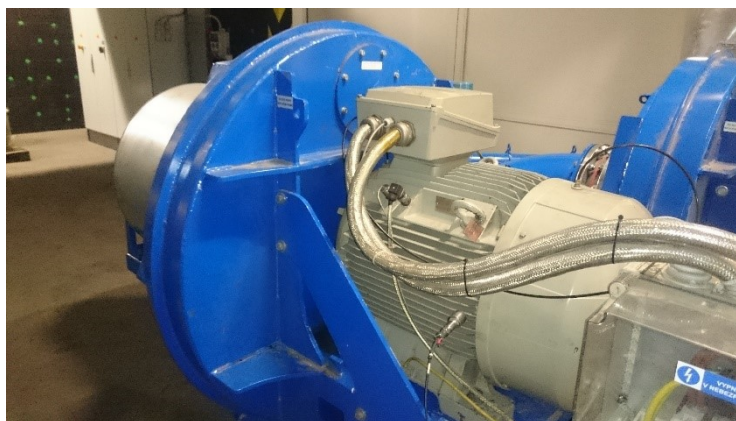
Bylo navrženo řádné ustavení os elektromotoru vůči ložiskům předlohy odborně způsobilou osobou s využitím laserového přístroje při každém zásahu do uložení stroje.

Výsledek návrhu na odstranění příčin poškození

Po ustavení elektromotoru vůči ložiskům předlohy bylo provedeno kontrolní měření, kde byl detekován významný posun hodnot z nepřijatelného pásma (D) do pásma (A-B) ustálených provozních hodnot.

7.3 Mechanické uvolnění

Analýzou naměřených hodnot na ventilátoru s označením Heating room č. 2 byly detekovány zvýšené hodnoty zrychlení vibrací a obálky vibrací na ložisku elektromotoru L2. Naměřené hodnoty rychlosti vibrací byly relativně nízké, konkrétně do 4 mm/s, s nízkými hodnotami amplitud na otáčkové frekvenci i na harmonických násobcích. Nicméně hodnoty zrychlení vibrací a obálky vibrací byly vyšší než 7 g, ačkoliv byl elektromotor v provozu pouhé tři měsíce.



Obrázek 30 – Ventilátor Heating room č. 2

Jednalo se o speciální případ uvolnění ložiska elektromotoru vlivem vymáčkání ložiskového víka. Původně statický vnější kroužek se již po tříměsíčním provozu, vzhledem k měkkému materiálu ložiskového víka, vymáčkal. Následně se vnější kroužek uvolnil a došlo k mikropohybům. To způsobilo viditelnou stykovou korozi na povrchu vnějšího kroužku ložiska. Mikropohyby se projeví ve frekvenčním spektru zrychlení (viz Obrázek 33) a obálky zrychlení (viz Obrázek 32) výraznou amplitudu na subharmonické frekvenci, přibližně na 20 Hz spolu s vyššími harmonickými násobky.

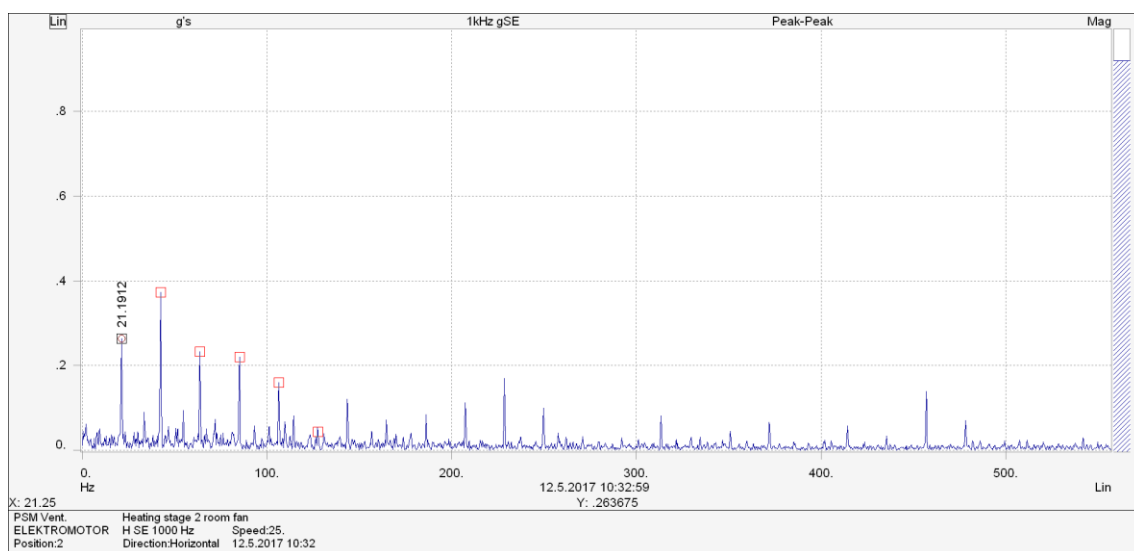


a)

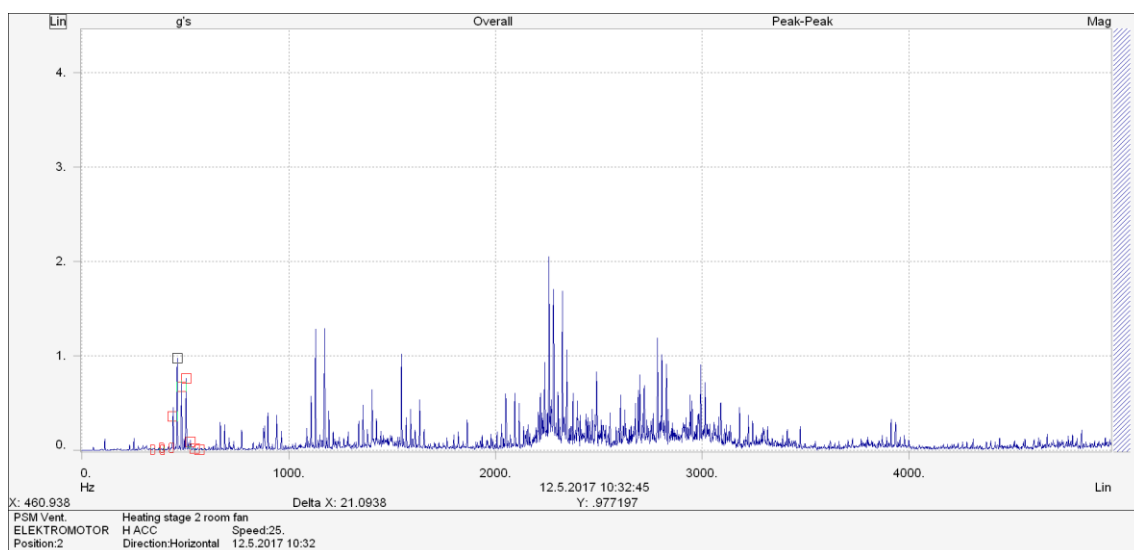


b)

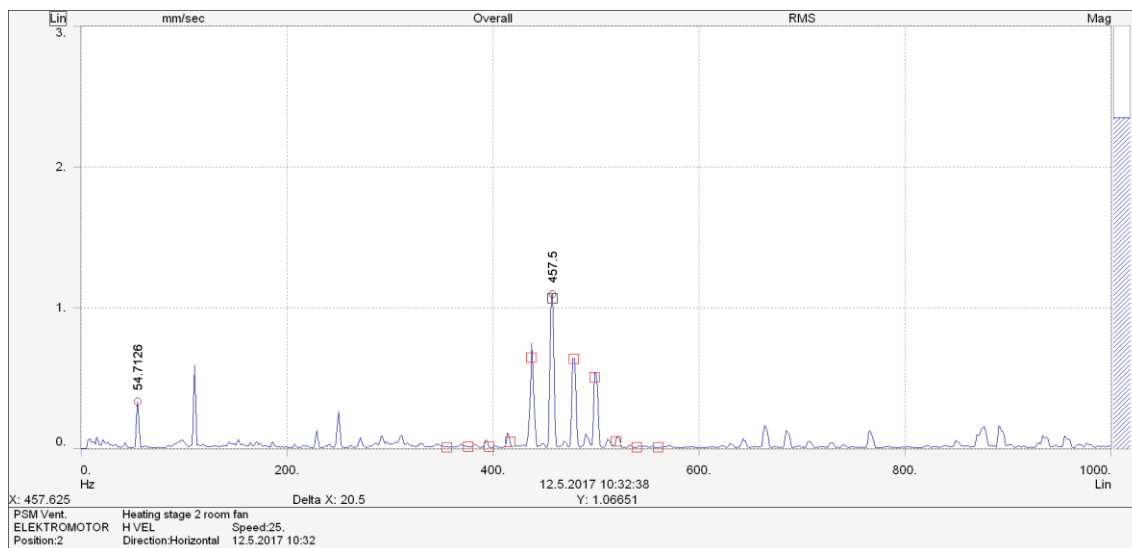
**Obrázek 31 – a) Poškození vnějšího kroužku ložiska L2 elektromotoru
b) Poškození ložiskového víka elektromotoru ventilátoru Heating room č. 2**



**Obrázek 32 – FFT spektrum obálky zrychlení vibrací
s hormopásmovým filtrem 1000 Hz ložiska elektromotoru L2
ventilátoru Heating room č. 2**



**Obrázek 33 – FFT spektrum zrychlení vibrací ložiska elektromotoru L2
ventilátoru Heating room č. 2 v horizontálním směru**



Obrázek 34 – FFT spektrum rychlosti vibrací RMS ložiska elektromotoru L2 ventilátoru Heating room č. 2 v horizontálním směru

Návrh na odstranění příčin poškození

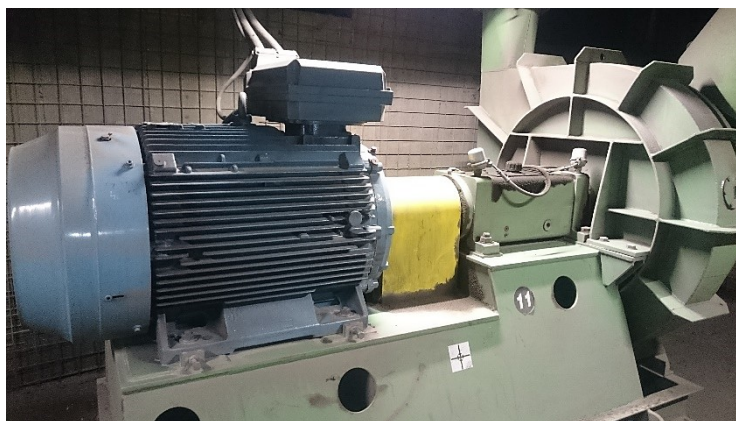
Bylo navrženo vyvložkování předního víka elektromotoru. Dalším doporučením bylo zajištění řízeného mazání ložiska elektromotoru pomocí centrálního automatického mazání za účelem zvýšení provozuschopnosti elektromotoru.

Výsledek návrhu na odstranění příčin poškození

Po provedení vyvložkování víka a zajištění řízeného automatického mazání se již problémy s vymačkáním víka elektromotoru nevyskytly.

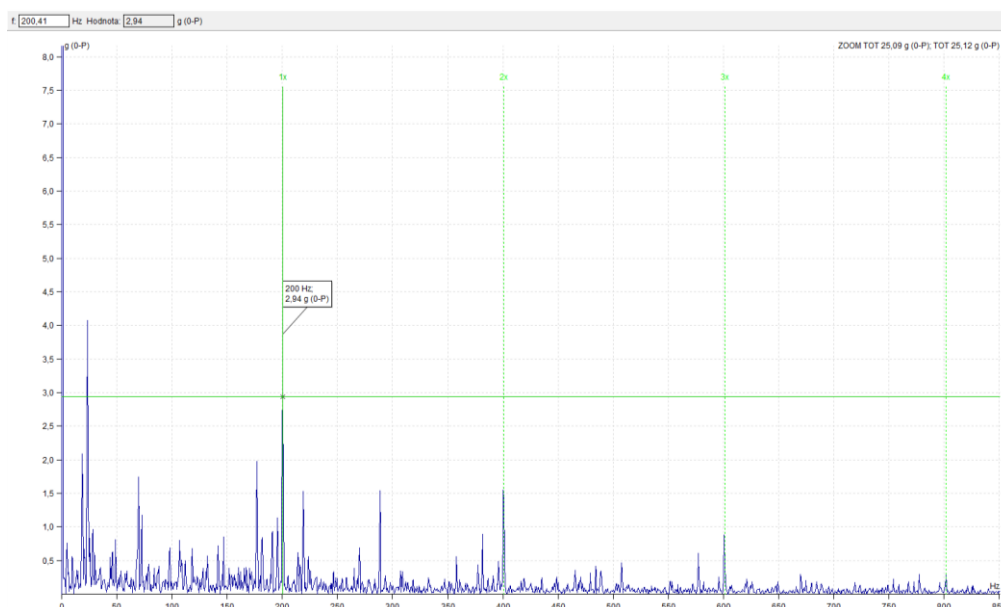
7.4 Ložiskové poškození

Analýzou naměřených hodnot na ventilátoru s označením RS levý bylo detekováno ložiskové poškození. Vlivem poklesu tlaku oleje v mazacím systému došlo k razantnímu poškození ložisek předlohy L3 a L4.

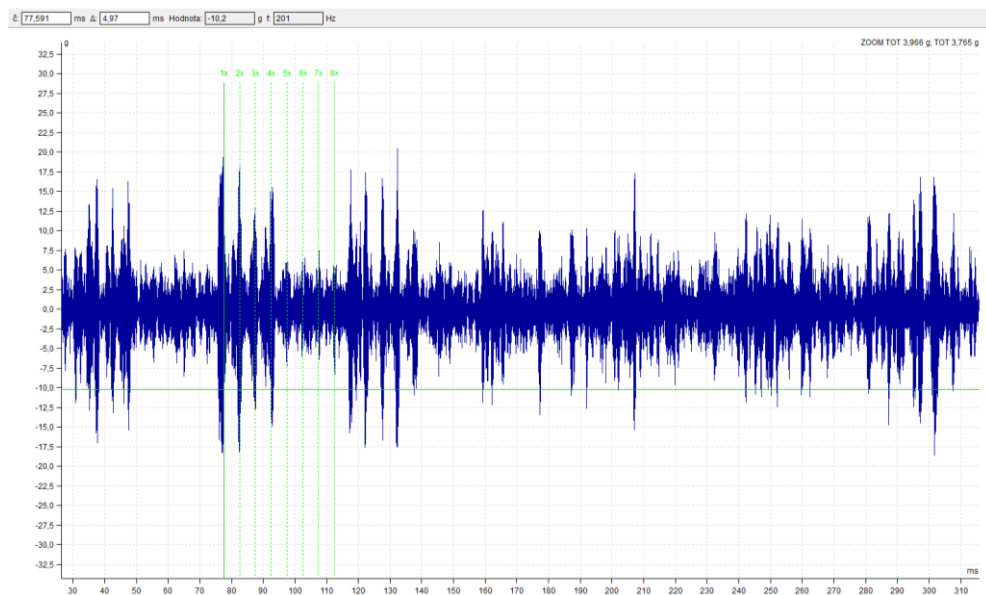


Obrázek 35 – Ventilátor RS levý

FFT spektrum obálky zrychlení vibrací ložiska předlohy L3 (viz Obrázek 36) se vyznačuje dominantní amplitudou na frekvenci 200 Hz s výraznými harmonickými násobky a postranními pásmy, jež je obrazem výrazného poškození vnitřního kroužku ložiska.



**Obrázek 36 – FFT spektrum obálky zrychlení vibrací
s hormopásmovým filtrem 1000 Hz ložiska předlohy L3 ventilátoru RS levý**



**Obrázek 37 – Časový signál ventilátoru RS levý ložiska L3 předlohy
v horizontálním směru s vyznačenými harmonickými násobky**

Návrh na odstranění příčiny poškození

Pro odstranění příčin poškození byla navržena výměna ložiska L3 předlohy. Dále bylo doporučeno při pravidelné kontrolně inspekční činnosti provádět i kontrolu celého mazacího systému včetně provozního tlaku čerpadla a funkčnosti mazání ložisek.

7.5 Nedostatečné mazání

Z hodnot pochůzkového měření bylo na ventilátoru s označením 17 Odtah spalin horního pásu detekováno nedostatečné mazání ložisek předlohy L3 a L4.



Obrázek 38 – Ventilátor 17 Odtah spalin horního pásu

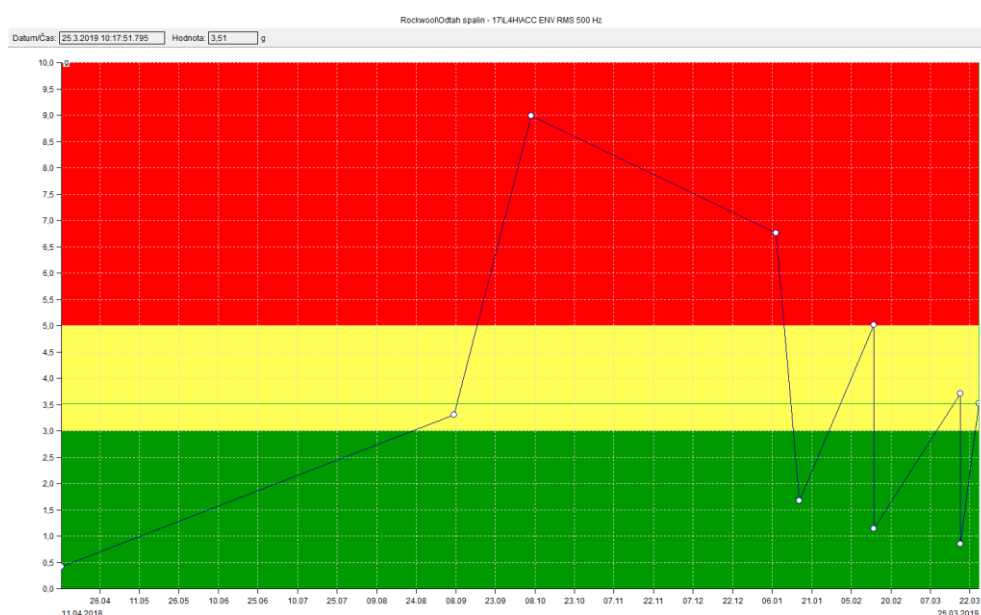
Jedná se o ventilátor odtahu spalin horního pásu, u kterého působením okolních podmínek je zapříčiněno, že plastické mazivo v ložiskách předlohy L3 a především L4, je dlouhodobě vystaveno zvýšeným teplotám. Zvýšené teploty zapříčiňují rychlejší degradaci maziva, což klade vyšší nároky na údržbu.

Z důvodu zanedbávání stanovených mazacích intervalů se aplikoval systém automatických maznic, který eliminoval lidský faktor. Konkrétně se jedná o nastavitelné automatické maznice typu Pulsarlube.



Obrázek 39 – Typy automatických maznic Pulsarlube ¹⁶

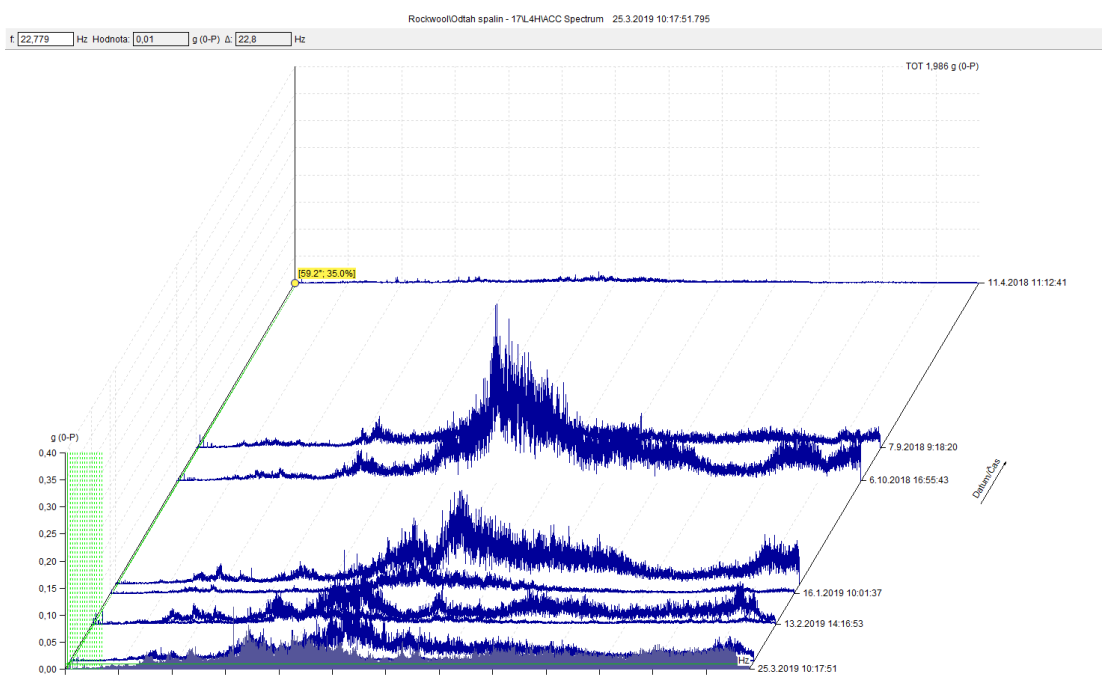
V první fázi aplikace automatických maznic byl nastaven přísun maziva dle doporučení výrobce ložiska. Vzhledem k opotřebení a pracovním podmínkám, ve kterých se ložiska nachází, byl na základě zkušeností přísun množství maziva podstatně zvýšen.



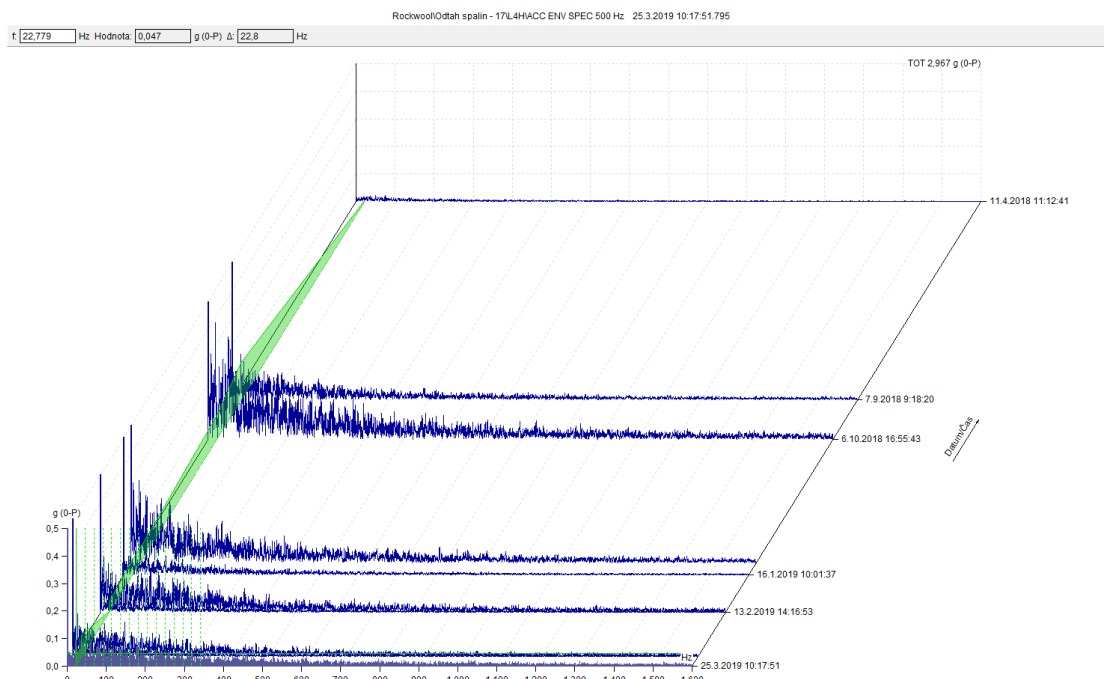
Obrázek 40 – Trend vývoje obálky zrychlení vibrací ložiska předlohy L4

Trend vývoje obálky zrychlení vibrací ložiska předlohy L4 za časové období od 11. 4. 2018 do 25. 3. 2019 (viz Obrázek 40). Hodnoty obálky zrychlení vibrací jsou vyneseny do barevných pásem dle klasifikace stavu ložiska. Zelené pásmo vyjadřuje provozní stav. Žluté pásmo značí zhoršený stav. Červené pásmo značí havarijní stav. V průběhu trendu lze pozorovat každý mazací cyklus, při kterém došlo k okamžitému poklesu a poté k opětovnému růstu hodnot s tím, že hodnoty výrazně zasahují až do pásma D.

V FFT spektru obálky zrychlení vibrací s hornopásmovým filtrem 1000 Hz ložiska předlohy L4 ventilátoru 17 Odtah spalin horního pásu (viz Obrázek 42) lze vidět patrný šum, způsobený nedokonalým mazáním ložiska.



Obrázek 41 – Kaskáda spekter zrychlení vibrací ložiska předlohy L4 ventilátoru 17 Odtah spalin horního pásu v horizontálním směru



Obrázek 42 – Kaskáda FFT spekter obálky zrychlení ložiska předlohy L4 ventilátoru 17 Odtah spalin horního pásu v horizontálním směru

Návrh na odstranění příčiny poškození

Návrhem bylo zavedení pravidelných kontrol stavu automatických maznic a striktní dodržování termínů výměn. Dále bylo doporučeno dbát na průchodnost maziva a mazacích cest.

Výsledek návrhu na odstranění příčin poškození

Po aplikaci automatických maznic se problém s nedostatečným mazáním podařilo z velké části eliminovat, což velice přispělo ke zvýšení provozuschopnosti a spolehlivosti ventilátorů.

Závěr

Podstatou bakalářské práce je stanovení a souhrn často detekovaných poruch na ventilátorech ve společnosti ROCKWOOL, a.s. na základě provádění aplikace vibrační diagnostiky. V úvodu teoretické části jsou sumarizovány přístupy vibrační diagnostiky, její principy a nástroje k detekci typických závad na ventilátorech. V praktické části je předložena metodika, popis řešení frekvenční analýzy a souhrn, stejně tak reálné ukázky detekovaných závad, které se v průběhu zavedení vibrační diagnostiky objevily.

Přínosem aplikace vibrační diagnostiky byla eliminace neplánovaných prostojů, kdy díky včasné predikci zařízení bylo možné provést nápravné opatření. Četným měřením vibrací byly zjištěny opakující se výkyvy v trendu frekvenčního spektra vibrací z důvodu nedostatečného mazání ložisek, jelikož docházelo k zanedbání mazacích intervalů. Tento nedostatek lidského faktoru byl eliminován použitím automatických maznic, což velice přispělo ke zvýšení provozuschopnosti a spolehlivosti ventilátorů.

Závěrem práce je doporučení pokračovat v pochůzkovém měření a u inkriminovaných zařízení zvýšit četnost měření, aby byla zajištěna kontinuita naměřených hodnot a tím zpřesnit trendy naměřených hodnot a stanovovat návrhy na opravy a opatření s ohledem na aktuální stav zařízení.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Lukáši Heisigovi, Ph.D., panu Ing. Janovi Mikolášovi a panu Ing. Davidovi Šeděnkovi za odborné vedení mé bakalářské práce. Velice si vážím cenných rad a připomínek, které mi v průběhu práce poskytli. Zároveň děkuji společnosti ROCKWOOL, a.s. za možnost nahlédnout do fungování mezinárodní společnosti a za poskytnutí informací a materiálů potřebných pro vypracování mé bakalářské práce.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HELEBRANT, František. *Technická diagnostika a spolehlivost–IV*. Provoz a údržba strojů. VŠB-Technická universita Ostrava, 2008, 130: 978-80.
- [2] HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost: Vibrodiagnostika. II*. VŠB-Technická universita Ostrava, 2004.
- [3] BLATA, Jan; JURASZEK, Janusz. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe*. VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013.
- [4] Interní materiály. 2018. Heistech, s.r.o.
- [5] HELEBRANT, František; HRABEC, Ladislav; BLATA, Jan. *Provoz, diagnostika a údržba strojů*. VŠB-Technická universita Ostrava, 2013, ISBN 978-80-248-3028-5.
- [6] SERRIDGE, Mark; LICHT, Torben R. *Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifiers: theory and application handbook*. 1987.
- [7] KREIDL, Marcel; ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika*. BEN–technická literatura, Praha, 2006, ISBN 80-7300-158-6.
- [8] ZUTH, Daniel; VDOLEČEK, František. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice*. In: Automa. FCC Public, 2010. p. 32-36.
- [9] PROCHÁZKA, František; KRATOCHVÍL, Ctirad. *Úvod do matematického modelování pohonových soustav*. CERM, 2002, ISBN 80-7204-256-4.
- [10] BERRY, J, E. *Ilustrovaná tabulka pro diagnostiku vibrací dle Berryho*, 1. vydání, Charlotte: Technical associates of Charlotte 2005_09
- [11] ROCKWOOL Česká republika: *ROCKWOOL International* [online]. 2017 [cit. 2019-02-03].
Dostupné z: <https://www.rockwool.cz/o-nas/>
- [12] Heistech. *Heistech* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2019-05-13].
Dostupné z: <https://www.heistech.cz/>

[13] AC102-Multi-Purpose Accelerometer, Top Exit Connector / Cable, 100 mV/g [online]. Canada: *Connection Technology Center*, 2014 [cit. 2019-05-13].

Dostupné z:

https://ctconline.com/ctc_100_mv_g_standard_size_accelerometers.aspx?prd=AC102

[14] Adash a4300 VA3 Pro [online]. *Adash*, 2019 [cit. 2019-05-13].

Dostupné z:

<https://adash.com/cs/prenosne-merici-systemy/a4300-va3-vibracni-analyzator>

[15] DDS Software [online]. *Adash*, 2019 [cit. 2019-05-13].

Dostupné z: <https://adash.com/cs/software/digital-diagnostics-system>

[16] Pulsarlube E120cc with SWEPCO 121 [online]. *Stratson*, 2019 [cit. 2019-05-13].

Dostupné z: <http://stratson.eu/product/pulsarlube-e120cc-with-swepco-121/>